



EMISSION DE HAUTE ENERGIE DES TROUS NOIRS GALACTIQUES

Andrea Goldwurm

► To cite this version:

Andrea Goldwurm. EMISSION DE HAUTE ENERGIE DES TROUS NOIRS GALACTIQUES. Cosmologie et astrophysique extra-galactique [astro-ph.CO]. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2006. tel-00150144

HAL Id: tel-00150144

<https://theses.hal.science/tel-00150144>

Submitted on 29 May 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EMISSION DE HAUTE ENERGIE DES TROUS NOIRS GALACTIQUES

Andrea Goldwurm

**Laboratoire AstroParticule et Cosmologie (APC) – Paris,
Service d’Astrophysique / DAPNIA / DSM / CEA – Saclay,
France**

**Habilitation à diriger des recherches
présentée à l’Université Paris 7 - Denis Diderot**

Soutenue le 12 Mai 2006 devant le jury composé de:

Pierre Binetruy
Giovanni F. Bignami
Bernard Degrange
Marcello Fulchignoni
Jacques Paul

President
Rapporteur
Rapporteur
Rapporteur interne
Examineur

À Ruby et Alessandro

Remerciements

Je désire remercier tout d'abord les étudiants, chercheurs, collègues et toutes personnes avec qui j'ai travaillé pendant ma carrière scientifique, en particulier dans le cadre des projets spatiaux SIGMA et INTEGRAL.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude aux rapporteurs, Giovanni Bignami, Bernard Degrange et Marcello Fulchignoni, pour avoir rapidement examiné ce mémoire dans sa version pas encore corrigée des fautes de français, et à Jacques Paul pour avoir entrepris la tâche ardue de me proposer des corrections. Bien évidemment j'assume la complète responsabilité des fautes qui restent.

Enfin, je dédie ce mémoire à Ruby, Alessandro, et aussi à mes parents, avec une pensée particulière pour mon père qui m'a toujours encouragé à poursuivre la voie de la recherche scientifique.

Table des matières

Introduction.....	7
I. Curriculum vitae	9
II. Résumé des activités de recherches	11
III. Activités d'encadrement.....	13
IV. Responsabilités scientifiques et administratives	14
V. Activités internationales.....	15
VI. Travaux et publications.....	17
VII. Publications principales.....	18
VIII. EMISSION DE HAUTE ENERGIE DES TROUS NOIRS GALACTIQUES.....	21
1. Introduction.....	21
1.1 Trous noirs et astrophysique	22
1.2 Accrétion sur les trous noirs et émission à haute énergie	30
1.3 Activité de recherche sur les trous noirs : origine, histoire et évolution.....	32
Bibliographie	36
2. Les télescopes à masque codé.....	37
2.1 Imagerie gamma avec les télescopes à masque codé.....	38
2.2 Les masques HURA et le projet GRASP.....	39
2.3 L'analyse des données SIGMA : champ partiellement codé et analyse fine	40
2.4 Le système d'analyse des données INTEGRAL/IBIS	44
2.5 La fonction de réponse angulaire du télescope IBIS d'INTEGRAL	45
Bibliographie	48
Publications présentées	49
3. Les systèmes binaires X à trou noir dans la Galaxie	51
3.1 Trous noirs dans les systèmes binaires serrés	52
3.2 Le spectre à haute énergie des systèmes binaires à trou noir.....	55
3.3 Etats spectraux, transitions et variabilité dans les binaires à trous noirs.....	57
3.4 Modèles et composantes à haute énergie	59
3.5 Raies d'émission à haute énergie et contribution SIGMA.....	61
3.6 Résultats majeurs après SIGMA et Compton-GRO	69
3.7 Résultats obtenus avec INTEGRAL	71
3.8 Conclusions	76
Bibliographie	78
Publications présentées	81
4. Le trou noir au centre de la Galaxie.....	83
4.1 Un laboratoire pour l'astrophysique des hautes énergies.....	85
4.2 Sgr A [*] : le trou noir supermassif du centre galactique.....	87
4.3 Observations SIGMA des régions centrales de la Galaxie	90
4.4 La question de la luminosité de Sgr A [*] et les modèles d'accrétion	93
4.5 L'activité éruptive de Sgr A [*] : observations avec XMM-Newton.....	99
4.6 Le noyau galactique vu par INTEGRAL	104
4.7 Interprétation des données INTEGRAL et observations jusqu'au TeV.....	107

4.8	La campagne 2004 d'observation multi longueurs d'onde de Sgr A [*]	111
4.9	Conclusions	120
	Bibliographie	121
	Publications présentées	123
5.	Projet de recherche et perspectives	125
5.1	Le futur immédiat : les programmes d'observation en cours.....	125
5.2	Le futur proche : les très hautes énergies.....	128
5.3	Le futur accessible : focaliser les rayons X durs.....	129
5.4	Conclusions : l'astroparticule, l'université et l'Europe	133
	Bibliographie	135
	Publications présentées	137
	Résumé	139
	Summary	140
	Annexe : Liste complète de publications	141

Introduction

Ce mémoire présente mon dossier pour l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches en science à l'université *Denis Diderot* de Paris 7.

Les premières sept sections contiennent les documents suivantes : un bref curriculum vitae (section I), un résumé chronologique des mes activités de recherche (section II), la liste des mes activités d'encadrement tant au niveau scientifique qu'au niveau manageriel (section III), mes responsabilités scientifiques et administratives, notamment dans les projets d'astronomie gamma auxquels j'ai participé (section IV). En section V je liste mes activités scientifiques internationales, comme l'organisation de conférences et les présentations invitées à des colloques, je donne ensuite les statistiques sur mes publications (section VI), la liste complète des mes travaux étant reportée en Annexe.

Le résumé chronologique des mes activités scientifiques (section II) dresse la liste des sujets des mes recherches sur des intervalles de 2-4 ans, en précisant mon statut, le laboratoire d'accueil et les responsables. J'énumère les principales sources X et gamma que j'ai étudiées, et pour chaque sujet, je donne la référence (numéro d'ordre) des publications relatives a ce sujet qui figurent dans la liste des mes travaux en Annexe (code A pour les publications dans des revues à comité de lecture, code C pour les comptes rendus des conférences, code T pour les circulaires et télégrammes astronomiques). Ce résumé sert à compléter la synthèse, plus élaborée, mais partielle, des mes travaux de recherche qui suit en section VIII, et à montrer le caractère relativement régulier de mon travail et des mes publications, mon implication directe à différents projets d'astronomie gamma, les laboratoires, les équipes avec qui j'ai travaillé et les collaborations internationales. Enfin, en section VII, je liste les treize publications que j'estime les plus importantes au cours de mes derniers 15 ans des recherche et qui ont servi de base à l'exposé sur mes activités scientifiques les plus significatives en section VIII.

Ma contribution majeure en astrophysique se situe sans doute dans le domaine de **l'observation des trous noirs galactiques**, en particulier l'observation de **l'émission X, X durs et gamma de basse énergie** de ces objets lorsqu'ils accrétaient de la matière. J'ai étudié en particulier certains **trous**

noirs dans des systèmes binaires X et le trou noir super massif au centre de notre galaxie. Pour réaliser ces études j'ai contribué au développement des **méthodes d'analyse des images obtenues par les systèmes à masque codé**, utilisés dans les télescopes X durs et gamma de basse énergie. Ce sont donc ces trois volets de mes programmes scientifiques que je présente en section VIII avec un dernier chapitre dédié à mes **programmes et perspectives futures**.

Dans ma carrière, surtout à partir de 1995, j'ai encadré un certain nombre de jeunes étudiants et chercheurs, mais aussi des ingénieurs informaticiens, qui ont contribué, les uns et les autres, au développement du programme scientifique exposé ici. Je tiens à souligner que les recherches que je décris se basent souvent sur leur travail.

Une note sur la présentation. Après bien des hésitations, j'ai décidé d'écrire ce mémoire en français. Par contre, certains termes scientifiques spécifiques et certains sigles resteront en anglais car ils sont d'usage commun. En général, je n'ai pas reproduit dans le texte les figures des articles attachés à ce mémoire, j'ai privilégié les figures des mes articles qui n'apparaissent pas dans ce choix ou, si non, des figures d'autres auteurs pour illustrer le sujet. Le lecteur est invité à visionner directement les figures de mes articles dans les publications qui sont annexées en fin de chaque chapitre, selon le schéma donné en section VII. Dans ces conditions, je précise que les articles présentés font parti du rapport et ils ne seront pas décrits en détail dans le texte car le lecteur peut les consulter directement.

I. Curriculum vitae

Nom : **Goldwurm** Prénom : **Andrea**
Date de naissance : **1^{er} Décembre 1959** Lieu de naissance: **Milan (Italie)**
Nationalité : **Italienne** Résident : **Paris (France)**

Unité Mixte de Recherche 7164, AstroParticule et Cosmologie (APC), Paris

Service d'Astrophysique / DAPNIA / DSM – CEA Saclay

Orme de Merisiers, Bat. 709, 91191 Gif sur Yvette, France

Tel : (33) 01 69 08 27 92 Fax : (33) 01 69 08 65 77 E-mail : agoldwurm@cea.fr

Ingénieur Chercheur au

Commissariat à l'Énergie Atomique de Saclay (CEA-Saclay)

Direction Sciences de la Matière (DSM)

Département d'Astrophysique, Physique Nucléaire et Instrumentation Associée (DAPNIA)

Service d'Astrophysique (SAp)

Laboratoire Phénomènes Cosmiques à Haute Energie (LPCHE)

Date d'arrivée dans l'unité (CTE) : novembre 1989

Début CDI (ingénieur chercheur) : novembre 1991

Classement CEA actuel : E5 (équivalent de Directeur de Recherche) depuis juillet 2000

Membre de

Groupement de Recherche Phénomènes Cosmiques à Haute Energie (GDR PCHE)

Union Astronomique Internationale (IAU)

Etudes et expérience professionnelle

Juillet 1978 Diplôme de *Maturità classica* au lycée G. Berchet de Milan (Italie).

23 Septembre 1985 Diplôme de *Dottore in Fisica* à l'Université de Milan.

Sep 85 – Jan 87 Collaborateur scientifique au *Consiglio Nazionale delle Ricerche* de Milan.
Professeur d'électronique et mathématiques au lycée G. Ferraris de Milan.

Fev 87 – Oct 88 Séjour post doctoral dans l'équipe d'astronomie gamma du *Physics Department* de l'Université de Southampton (UK).

Nov 88 – Nov 91 Séjour post doctoral au Service d'Astrophysique du CEA, Saclay.

Nov 91 à ce jour Ingénieur chercheur au SAp-CEA Saclay, dans le group d'astronomie gamma puis au Laboratoire Phénomènes Cosmiques de Haute Energie.

Janvier 2005 Membre de l'UMR Astroparticule et Cosmologie – Paris.

Domaines de recherche

- Astrophysique des objets compacts galactiques
- Astronomie X et gamma
- Instrumentation et méthodes d'analyse des données d'astronomie X et gamma

Projets et sujets de recherche

- Astronomie X : analyse et interprétation des données de télescopes X de sources galactiques.
- Etude du projet gamma GRASP : méthodes d'imagerie gamma à masques codées.
- Expérience d'astronomie gamma spatiale SIGMA : étude des méthodes d'analyse, de la réponse en vol, analyse et interprétation des données des sources compactes (avec trous noirs ou étoiles à neutrons) accrétantes galactiques et du noyau de la Galaxie. Observations X des sources SIGMA.
- Projet gamma spatial INTEGRAL/IBIS : définition et développement du segment sol d'INTEGRAL, étude des méthodes d'analyse, simulations des performances, préparation du programme scientifique, contribution aux phases opérationnelles et aux étalonnages en vol. Analyse et interprétation des données. Observations X des sources INTEGRAL.
- Projet SIMBOL-X : contribution à la définition du projet en particulier du segment sol, participation à la phase 0 et à la phase A d'étude.

Responsabilités

1990 – 1995	Participation aux opérations de contrôle SIGMA à la station de réception.
Depuis 1995	Co-Investigateur IBIS pour la contribution CEA au projet INTEGRAL.
Depuis 1996	Responsable IBIS pour le centre scientifique de données d'INTEGRAL (ISDC), responsable SAp du développement des logiciels pour l'ISDC et de la participation SAp/DAPNIA au projet ISDC
2000-2005	Membre du <i>Time Allocation Committee</i> du projet INTEGRAL

Encadrements

- Encadrement scientifique de 3 stages de DEA, de 3 thèses, et 4 stages post doctoraux.
- Encadrement, pour le projet de Centre de Données ISDC, de 4 ingénieurs informaticiens.
- Coordination du travail du SAp et de 4 laboratoires IBIS (2 italiens, un polonais et un anglais) pour le développement des logiciels spécifiques IBIS à installer à l'ISDC.

Publications

233 publications, dont 100 sur des revues à comité de lecture, 108 dans de comptes rendus de conférences, 25 circulaires. Edition scientifique d'un livre de comptes rendus de Conférence.

Langues

Italien, Français, Anglais.

II. Résumé des activités de recherches

1984-1986 – *Istituto di Fisica Cosmica et Tecnologia Relative del CNR*, Milan (Italie) – Thèse (*Tesi di laurea*) à l'*Università degli studi* de Milan, sous la direction du Prof. G. F. Bignami et codirection du Prof. G. Sironi. Collaboration scientifique après thèse à l'IFCTR/CNR.

- Etude des sources X galactiques trouvées dans des boîtes d'erreur des sources gamma COS-B avec des données des télescopes X de l'observatoire Einstein (HEAO II) et de l'observatoire EXOSAT. Etude d'un reste de supernova X, de deux pulsars X binaires, une source diffuse liée à une étoile Wolf Rayet, un pulsar milliseconde (A1-5,C1-2).

1987-1988 – *Physics Department of Southampton University*, Southampton (UK) – Stage postdoctorale sous la direction du Prof. A. J. Dean (financement: bourse *Della Riccia* et contrat du *Science and Engineering Research Council*).

- Étude des systèmes d'imagerie à masques codés pour l'astronomie gamma. Participation à la définition du projet GRASP (projet précurseur d'INTEGRAL) (A6-10,C3-4).

1989-1991 – Service d'Astrophysique du CEA, Saclay (France) – Stage Post-Doctorale sous la direction du Dr. J. Paul (financement: CTE du CEA, bourse de la CEE, bourse italienne du CNR).

- Développement des logiciels d'analyse des données du télescope gamma à masque codé SIGMA pour la mission franco-russe GRANAT. Etalonnage et étude des performances en vol du télescope SIGMA (lancement 1^{er} décembre 1989) (A42,C8,14,19).
- Etude des certaines sources de haute énergies détectées avec SIGMA : les microquasars 1E 1740-2942 (A11-13,19-20,23-24,30) et GRS 1758-258 (A32,C26) dans la région du centre galactique (C9,11,15,18), les systèmes binaires avec étoile à neutrons 4U 1700-377, Tra X-1, GX1+4, KS 1730, Terzan 2 (A16-18,21,25, C7,12,21-22).
- Etude détaillée de la Nova-X de la constellation de la Mouche (Nova Muscae 1991) avec les données SIGMA et détection d'une raie à haute énergie (A14-15,26-27,C16-17,24).

1992-1994 – SAp/CEA-Saclay (France) – Ingénieur Chercheur (classement C2).

- Etude détaillée des données SIGMA de deux autres novae-X à trou noir brillantes (Nova Persei 92, Nova Ophiuchi 93) et du microquasar transitoire GRS 1915+105 (A31,33-35,37,40,48,54,C27,39,47,54).
- Etude détaillée des données SIGMA relatives à des systèmes binaires X galactiques avec étoile à neutrons de type *bursters* (A 1742-294, GX 354-0, SLX 1735-235, source dans Terzan 1) (A36,41,43,45,C23,25,36).
- Etude détaillée des données SIGMA relative au Bulbe et au Centre Galactiques (C29-34). Recherche d'émission gamma du trou noir du noyau galactique (A39).

1995-1997 – SAp/CEA-Saclay (France) – Ingénieur Chercheur (C2).

- Suivi des systèmes binaires X détectées par SIGMA avec des télescopes X (ROSAT, ASCA) (GRS 1758-258, SLX 1735-235) (A38,49-50,C28,49).
- Analyse de l'ensemble des données SIGMA du bulbe et du centre de la Galaxie (A46,57,C37,44-45,53,57,60).
- Etude des novae X faibles du bulbe galactique, GRS 1730-312, XTEJ1755-324, GRS 1739-278 et de celle dans la constellation des voiles GRS 1009-45 (A44,47,51,53,55,59,C40,46,48,50,56, 61).

- Participation à la définition du télescope à masque codé IBIS/ISGRI du projet INTEGRAL. Développement d'outils de simulation et analyse des données IBIS/ISGRI (C42,43,51,52,54). Début projet ISDC.

1998-2000 – SAp/CEA-Saclay (France) – Ingénieur Chercheur (E4).

- Phases finales de l'analyse des données SIGMA (A62,A81).
- Participation au projet INTEGRAL (consortium IBIS), notamment pour le développement du segment sol (opération camera ISGRI) et de l'analyse scientifique des données IBIS dans le cadre du centre scientifique des données d'INTEGRAL (ISDC) (A63,C59,62-66,70,75).
- Participation au programme avec temps garanti XMM-Newton du SAp pour le suivi du centre galactique. Analyse des données XMM et étude des sources compactes de la région (GRS 1758-258, GRO J1744, 1E 1743.1-2843) (A64-65,67,C73,74,76).

2001-2002 – SAp/CEA-Saclay (France) – Ingénieur Chercheur (classement E5).

- Projet INTEGRAL (consortium IBIS) et interface IBIS-ISDC : finalisation des logiciels d'analyse, intégration dans le système ISDC, tests dans le système ISDC et du segment sol INTEGRAL (C68,78).
- Campagne de calibration au sol, de lancement (17 octobre 2002) et de recette en vol d'INTEGRAL. Test et recette des logiciels à l'ISDC. Recette de l'ISDC.
- Programme temps garanti XMM du SAp sur le centre galactique : détection de sursauts X de la source Sgr A^{*}, le trou noir massif du centre galactique (A66,68,C79,81,85).
- Préparation des programmes d'observation du centre galactique et des novae X avec INTEGRAL (C59,64,66,69,71,72).

2003-2005 – SAp/CEA-Saclay et UMR APC-Paris (France) – Ingénieur Chercheur (E5).

- Analyse et publication des premiers résultats INTEGRAL : Cyg X-1 et Cyg X-3 (A74,76,77,C95) et autres binaires X galactiques (A69,75,78,83,C84,89,90).
- Publication des articles sur IBIS et le système d'analyse des données IBIS (A70-73,100,C100).
- Analyse et publication des données INTEGRAL (core program) sur le centre galactique (A79,93,C82,86,98) et sur l'émission diffuse galactique (A80,84,C88).
- Observations d'une nova X du Bulbe Galactique (XTE J1720-318) avec INTEGRAL, RXTE, XMM, de Cyg X-1 pendant un état intermédiaire avec INTEGRAL et d'une nova de l'halo (SWIFT J1753) avec INTEGRAL, RXTE et en radio et IR. Analyse des données et publications des résultats (A82,94,98,C97,99,101,103). Etudes d'autres binaires X à trou noir (1E 1740, IGR J1746, 4U 1630, GRS 1758) avec INTEGRAL (A85,86,89,C87,92,96,102,105).
- Etude de pulsars X binaires à la milliseconde (A88,92,C91) et autres binaires X avec étoiles à neutrons (A87,96,97,C93,94) avec INTEGRAL
- Campagne 2004 d'observation multi longueur d'onde (INTEGRAL, XMM-Newton, HST, VLA et autres) de Sgr A^{*}. Analyse et publication des résultats (A90,91,93,95,99,C106,107,108).
- Contribution à la définition des objectifs scientifiques et du segment sol scientifique du projet spatial SIMBOL-X (phase 0 d'étude) (C80,83,104).

III. Activités d'encadrement

Astrophysique (ordre chronologique inverse)

- Thèse doctorale (Ecole doctorale d'astrophysique d'Ile de France, Université Paris 7) de **Marion Cadolle Bel** sur l'analyse de données INTEGRAL des systèmes binaires galactiques avec trou noirs (octobre 2003 – septembre 2006).
- Stage de DEA d'Astrophysique (Université Paris 7) de **Marion Cadolle-Bel** sur l'analyse des données INTEGRAL de la source Cyg X-1 (avril – juin 2003).
- Thèse doctorale (Ecole doctorale d'astrophysique d'Ile de France, Université Paris 7) de **Guillaume Bélanger** sur l'analyse de données INTEGRAL et XMM-Newton du centre galactique (janvier 2003 – mai 2006).
- Contribution au suivie du stage post-doctoral (contrat CDD INSU/CNES) de **Maurizio Falanga** sur l'analyse des données INTEGRAL des binaires X de basse masse et des pulsars X accréteurs (depuis 2002).
- Stage post-doctoral (contrat CTE) de **Sergei Kuznetsov** sur l'analyse des données INTEGRAL des pulsars X binaires (octobre 2002 - octobre 2004).
- Suivi du stage post-doctoral (contrat CDD INSU/CNES) de **Jérôme Rodriguez** sur l'analyse des données INTEGRAL et support IBIS à l'ISDC (octobre 2002 – décembre 2004).
- Stage de DEA d'Astrophysique (Université Strasbourg) de **Elisabeth Brion** sur l'analyse des données XMM du Centre Galactique (mars – juin 2002). Actuellement en stage postdoctorale au SAp/CEA-Saclay.
- Stage de DEA de Physique Théorique (Université) de **Dan Israël** sur l'analyse des données XMM de la source GRS 1758-258 (janvier – mars 2001). Actuellement en stage postdoctorale à l'institut Weizman (Is).
- Stage post-doctoral (bourse CIES, contrat CTE et contrat INSU/CNES) de **Paolo Goldoni** sur l'analyse des données SIGMA des novae X à trou noir et du Centre Galactique (octobre 1996 - octobre 1998). Actuellement ingénieur chercheur au SAp/CEA-Saclay.
- Thèse doctorale (Ecole doctorale d'astrophysique d'Ile de France, Université Paris 7) de **Marielle Vargas** sur l'analyse de données SIGMA du Bulbe Galactique (octobre 1994 - juin 1997). Marielle Vargas a obtenu ensuite une bourse ESA post-doctorale à l'ISDC, Versoix, Suisse. Actuellement employée à Matra Espace, Toulouse.
- Stage post-doctoral (contrat CTE du CEA) de **Pedro David** sur l'analyse des données X ASCA du système binaire avec étoile à neutrons SLX 1735-265 (1996).

- Stage de DEA d'Astrophysique (Observatoire de Meudon) de **Sandrine Faisse** sur l'analyse des données SIGMA du système binaire avec étoile à neutrons SLX 1735-265 (janvier – juin 1994).
- Stage de fin d'année d'école d'ingénieur (École centrale de Paris) de **Pierre Olivier Petrucci** sur l'analyse des données SIGMA du système binaire avec étoile à neutrons 2A 1742-294 (avril – juin 1993). Actuellement astrophysicien au LAOG de Grenoble.

Analyse des données et développement de logiciel (ordre chronologique inverse)

- Encadrement d'une partie du travail de **Séverin Chazalmartin** (CDD INSU/CNES à partir d'octobre 2003) sur le développement et la maintenance des modules de prétraitement des données ISGRI/IBIS d'INTEGRAL pour le projet INTEGRAL/IBIS/ISDC.
- Encadrement du travail d'**Alexandra Gros** (CDD INSU/CNES d'avril 2000 à mars 2003, puis ingénieur au CEA depuis juin 2003) sur la correction et la reconstruction d'images et de spectres et sur l'analyse temporelle avec les données ISGRI/IBIS d'INTEGRAL pour le projet INTEGRAL/IBIS/ISDC.
- Encadrement du travail de **Pedro David** (CDD INSU/CNES de juillet 2000 à juillet 2003) sur la préparation et la correction des données ISGRI/IBIS d'INTEGRAL pour le projet INTEGRAL/IBIS/ISDC.
- Suivi du travail de **Aymeric Sauvageon** à l'ISDC (mission longue durée à l'ISDC de août 2001 à août 2004, puis au laboratoire) sur le suivi et l'étude des performances de la camera ISGRI/IBIS pour le projet INTEGRAL/IBIS/ISDC.
- Suivi du travail de **David Landriu** à l'ISDC (mission longue durée à l'ISDC en avril 2000 à décembre 2003) sur la configuration système pour le projet INTEGRAL/ISDC.

IV. Responsabilités scientifiques et administratives

- **Responsabilité du projet SAp/DAPNIA/CEA INTEGRAL-ISDC**
 - Responsable de la participation directe SAp/DAPNIA au projet INTEGRAL/ISDC.
 - Responsable de la participation SAp/DAPNIA à la contribution du consortium IBIS à l'ISDC (projet INTEGRAL/IBIS/ISDC).
 - Responsable des ressources informatiques SUN/Solaris pour le groupe INTEGRAL de Saclay.
- **Responsable du développement du logiciel spécifique IBIS pour l'ISDC**
 - Responsable de l'interface IBIS-ISDC
 - Coordination des équipes IBIS pour le développement du logiciel spécifique IBIS pour l'ISDC. Coordination du travail des équipes du SAP/CEA Saclay, IASF/CNR Bologne et IASF/CNR Rome (Italie), Université de Southampton (UK).

- **Définition, planification, coordination et control** du développement et des livraisons du logiciel spécifique IBIS à l'ISDC.
- **Contribution à la définition détaillée, au développement et test** du logiciel spécifique IBIS pour la partie relative à la camera ISGRI de IBIS développée au CEA.
- **Co - Investigateur du projet INTEGRAL/IBIS**
 - Contribution à la définition de l'instrument IBIS.
 - Contribution à la définition et tests du segment sol d'INTEGRAL (ISDC, ISOC, MOC).
 - Contribution à l'étalonnage en vol d'IBIS.
 - Définition et exploitation des données du temps garanti.
- **Membre du comité international d'attribution du temps d'observation INTEGRAL (TAC)**
 - Participation au panel « objet compacts » du TAC INTEGRAL pour les appels d'offre AO1 (2000), AO2 (2003) et AO3 (2004).
- **Coordination de collaborations ou réseaux**
 - Collaboration GDR PCHE sur le thème : *Phénomènes de haute énergie dans le centre Galactique*. 15 chercheurs de 5 instituts français (année 2004 et 2005).

V. Activités internationales

- **Contributions invitées à conférences**

SIGMA Observations of Nova Muscae 1991

Workshop "Nova Muscae 1991", 14-16 Mai 1991, Lyngby, Danemark.

SIGMA Observations of the X-Ray Nova in Musca

Conférence "Recent Advances in High Energy Astronomy", 17-20 Mars 1992, Toulouse, France.

Imaging Techniques Applied to the Coded Mask SIGMA Telescope

Conférence "Imaging in High Energy Astronomy", 27-30 Septembre 1994, Anacapri, Italie.

The Gamma-Ray Sky as Seen by SIGMA

Conférence "Multifrequency Behavior of High Energy Cosmic Sources", Frascati Workshop 1995, 22-27 Mai 1995, Vulcano, Italie.

SIGMA/GRANAT Results on the X-Ray Novae

Conférence "Black Hole X-Ray Transients", 21-27 Janvier 1996, Aspen Center for Physics, (Co) USA.

The Imager on Board the INTEGRAL Satellite

École d'hiver "Observing with INTEGRAL", 30 Mars 2000, Les Diablerets, Suisse.

The Center of our Galaxy: Activity & High-Energy Emission of the Closest Massive Black Hole

The 4th INTEGRAL Workshop "Exploring the Gamma-Ray Universe", 4-8 Sep 2001, Alicante, Spain.

High-Energy Emission from Galactic Black Hole Systems

22nd Astrophysics Moriond Meeting "The Gamma Ray Universe", 9-16 March 2002, Les Arcs, France.

XMM and INTEGRAL Observations of the Galactic Center Region

The 10th Marcel Grossman Meeting on Relativistic Astrophysics, 16-23 Juillet 2003, Rio de Janeiro, Brasil.

X-Ray Observations of Sgr A* and INTEGRAL monitoring of the Galactic Centre

5th Agile Workshop “The Galactic Centre and other Cosmic Accelerators”, 2 feb 2005, Rome, Italy.

The Galactic Centre at High Energies

Conférence Cerenkov 2005 “Towards a network of Atmospheric Cerenkov Detectors”, 27-29 april 2005, Palaiseau, France.

Gamma-ray emission and the INTEGRAL view of the Galactic Center

5th APC Workshop 2005 “High Henergy Phenomena in the Galactic Center”, 15-17 june 2005, Paris, France.

- **Contributions à écoles et ateliers**

Le Centre Galactique

Atelier Simbol-X, fevrier 2004, CNES Paris, France

The IBIS/ISGRI Data Analysis

1st INTEGRAL Data Analysis Workshop, 5-8 Oct 2004, Versoix, CH

Les données au sol : l'ISDC

Ecole IN2P3 "Méthodologie et techniques spatiales", 23-29 janvier 2005, Bénodet, France

The IBIS/ISGRI Data Analysis

2st INTEGRAL Data Analysis Workshop, 12-15 Oct 2005, Versoix, CH

- **Organisation d'écoles et conférences**

The Gamma-Ray Universe, XXII Astrophysics Morion Meeting (Les rencontres de Moriond), Mars 2002, Les Arcs, Savoie, France (**chairman** du comité d'organisation et comité scientifique).

Black Holes in the Universe, École de Cargese, juin 2003, Cargese, Corse, France, (comité d'organisation).

High Energy Phenomena in the Galactic Center, Atelier APC 2005, séminaires et conférence internationale, 6-24 juin 2005, Paris, France (**chairman** du comité d'organisation et scientifique).

The Galactic Center Conference 2006, 18-22 avril 2006, Bad Honnef, Germany, (comité scientifique).

Physics and Astrophysics of Supermassive Black Holes, juillet 2006, Santa Fe, New Mexico, US (comité scientifique).

- **Conférences et séminaires**

Participation à plus de 20 conférences internationales avec contribution orale ou poster et invité à plus de 10 séminaires à Saclay, en France et à l'étranger.

- **Référé**

A plusieurs reprises pour **The Astrophysical Journal** et **Astronomy and Astrophysics**.

- **Observateur invité**

Pour les programmes temps ouvert des observatoires spatiales Einstein, Exosat, ROSAT, ASCA, Rossi-XTE, XMM-Newton, INTEGRAL, HST. Pour les programmes temps garanti SIGMA/GRANAT, XMM-Newton, INTEGRAL.

- **Formations**

- Stage CEA / INSTN sur **Encadrement et suivi de la thèse**, 18-19 mai 2000
- Stage CEA sur **Séminaire E5**, Paris 10-12 juin 2002.

VI. Travaux et publications

Nombre totale de publications scientifiques : 233

100 articles publiés (ou en cours de publication) dans des revues à comité de lecture

108 articles publiés dans des comptes-rendus de conférences

25 circulaires à l'Union Astronomique Internationale

Le site ADS (http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html) fait apparaître (en juillet 2006) 226 publications à mon nom, avec un total de 2311 citations, 12 comme premier auteur dans des journaux à comité de lecture, dont 4 avec plus de 40 citations (voir section VII).

Editions de livres et articles de divulgation scientifique :

1 livre (édition d'une conférence internationale).

1 article publié dans des revues de divulgation scientifique.

Quelques contributions à des revues, des sites de divulgation scientifique et à des communiqués de presse.

La **liste complète des publications**, classées en publications à comité de lecture (code A), publications dans des comptes rendus de conférences (code C), télégrammes ou circulaires à l'IAU (code T) est reportée en **Annexe**.

VII. Publications principales

Les télescopes à masque codé (VIII-2)

- 1 **Imaging Techniques Applied to the Coded Mask SIGMA Telescope**
A. Goldwurm,
1995, *Experimental Astronomy*, 6, 9
- 2 **The INTEGRAL/IBIS scientific data analysis**
A. Goldwurm, P. David, L. Foschini, A. Gros, P. Laurent, A. Sauvageon, A. J. Bird, L. Lerusse and N. Produit,
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L223 (n°. de citations 94)
- 3 **The INTEGRAL IBIS/ISGRI System Point Spread Function and Source Location Accuracy**
A. Gros, A. Goldwurm, M. Cadolle-Bel, P. Goldoni, J. Rodriguez, L. Foschini, M. Del Santo and P. Blay,
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L179 (n°. de citations 51)

Les systèmes binaires X à trou noir dans la Galaxie (VIII-3)

- 4 **SIGMA/GRANAT Soft Gamma-Ray Observations of the X-Ray Nova in Musca: Discovery of Positron Annihilation Emission Line**
A. Goldwurm, J. Ballet, B. Cordier, J. Paul, L. Bouchet, J.-P. Roques, D. Barret, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Dyachkov, N. Khavenson, V. Kovtunenkov, R. Kremnev, K. Sukhanov,
1992, *The Astrophysical Journal (Letters)*, 389, L79 (n°. de citations 105)
- 5 **SIGMA/GRANAT Discovery of GRS 1739-278, a Hard X-Ray Transient in the Galactic Bulge**
M. Vargas, A. Goldwurm, P. Laurent, J. Paul, E. Jourdain, J.-P. Roques, V. Borrel, L. Bouchet, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, B. Novikov, A. Dyachkov, N. Khavenson, K. Sukhanov & N. Kuleshova,
1997, *The Astrophysical Journal*, 476, L23
- 6 **INTEGRAL, XMM-Newton and Rossi-XTE Observations of the State Transition of the X-ray Transient and Black Hole Candidate XTE J1720-318**
Cadolle Bel, M.; Rodriguez, J.; Sizun, P.; Farinelli, R.; Del Santo, M.; Goldwurm, A., Goldoni, P.; Corbel, S.; P.; Parmar, A. N.; Kuulkers, E.; del Santo, M.; Ubertini, P.; Frontera, F., Amati, L.; Roques, J.-P.; Westergard, J.,
2004, *Astronomy & Astrophysics*, 426, 659

Le trou noir au centre de la Galaxie (VIII-4)

- 7 **Possible Evidence against a Massive Black Hole at the Galactic Centre**
A. Goldwurm, B. Cordier, J. Paul, J. Ballet, L. Bouchet, J.-P. Roques, G. Vedrenne, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Finogenov, A. Vikhlinin, A. Dyachkov, N. Khavenson, & V. Kovtunenkov,
1994, *Nature*, 371, 589 (n°. de citations 58)

- 8 **The Center of our Galaxy: Activity and High-Energy Emission of the Closest Massive Black Hole**
A. Goldwurm,
2001, *Proc. of the 4th INTEGRAL Workshop*, 4-8 Sep 2000, Alicante, Spain, Eds. A. Gimenez, V. Reglero, C. Winkler, ESA SP - 459, 455

- 9 **A New X-Ray Flare from the Galactic Nucleus Detected with the XMM-Newton European Photon Imaging Cameras**
A. Goldwurm, E. Brion, P. Goldoni, P. Ferrando, F. Daigne, A. Decourchelle, R. S. Warwick, P. Predehl,
2003, *The Astrophysical Journal*, 584, 751 (n^o. de citations 47)

- 10 **INTEGRAL Detection of Hard X-Ray Emission from the Galactic Nuclear Region**
G. Bélanger, A. Goldwurm, P. Goldoni, J. Paul, R. Terrier, M. Falanga, P. Ubertini, A. Bazzano, M. Del Santo, C. Winkler, A.N. Parmar, E. Kulkeers, K. Ebisawa, J.P. Roques, N. Lund, F. Melia,
2004, *The Astrophysical Journal Letters*, 601, L163

- 11 **A Persistent High-Energy Flux from the Heart of the Milky Way: Integral's view of the Galactic Center**
G. Bélanger, A. Goldwurm, M. Renaud, R. Terrier, F. Melia, N. Lund, J. Paul, F. Yusef-Zadeh,
2006, *The Astrophysical Journal*, 636, 275

- 12 **Repeated X-ray Flaring Activity in Sagittarius A***
G. Bélanger, A. Goldwurm, F. Melia, F. Yusef-Zadeh, P. Ferrando, D. Porquet, N. Grosso, R. Warwick,
2005, *The Astrophysical Journal*, 635, 1095

Projet de recherché et perspectives (VIII-5)

- 13 **SIMBOL-X, a formation flying-mission for hard X-ray astrophysics**
P. Ferrando, A. Goldwurm, P. Laurent O. Limousin, J. Martignac, F. Pinsard, Y. Rio, J.P. Roques, O. Citterio, G. Pareschi, G. Tagliaferri, F. Fiore, G. Malaguti, U. Briel, G. Hasinger, L. Strueder,
2005, Conf. Proc. SPIE "*Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy II*", San Diego July 31st-Aug.4th, 2005, Vol.5900, 195, astro-ph/0508674

VIII. EMISSION DE HAUTE ENERGIE DES TROUS NOIRS GALACTIQUES

1. Introduction

Mon activité de recherche en astrophysique a été centrée sur l'étude des sources galactiques de rayonnement X et gamma. En particulier je me suis consacré à l'étude de l'émission à haute énergie générée par l'accrétion de matière dans les objets compacts. Parmi les objets compacts accrétants, les trous noirs sont ceux qui produisent la radiation plus dure. Ils ont été les cibles prioritaires de mes recherches. Pourtant j'ai aussi participé et je participe encore, à l'étude de plusieurs systèmes binaires galactique avec étoile à neutrons et en particulier à l'étude de pulsars X accrétants et de sursauteurs X dans des systèmes binaires de faible masse. Je me limiterais, dans ce mémoire, à présenter mes travaux principaux sur les trous noirs galactiques. Après une introduction historique générale sur l'astrophysique des trous noirs (suite de ce chapitre) je décrirai en particulier les résultats des programmes de recherche développés pour étudier ceux dans des systèmes binaires de faible masse et de type transitoire (chapitre 3) ainsi que le trou noir supermassif de la Galaxie (chapitre 4).

Les trous noirs se révèlent en général être de sources X très dures, car ils présentent des spectres en énergie qui souvent s'étalent bien au-delà de la bande X classique¹. Le domaine prioritaire pour l'étude des propriétés des trous noirs galactiques est donc celui des hautes énergies, de rayons X

¹ Ici et par la suite je dénommerai rayons **X mous** les photon d'énergie entre 0,1 et 2 keV, rayons **X classiques** ceux entre 2 et 10 keV, rayons **X durs** entre 10 et 100 keV et **gamma mous** entre 100 keV et 10 MeV. Cette définition, plutôt de type instrumentale que physique, est totalement arbitraire mais relativement courante dans notre domaine. Par analogie, un **spectre mou** est un spectre qui décroît rapidement avec l'énergie alors qu'un **spectre dur** a une pente plus plate et s'étend vers les hautes énergies.

durs et gamma mous. Depuis 1987, mon activité de recherche a été fortement couplée à des projets spatiaux d'astronomie X/gamma. Dans ces projets, mon rôle était, entre autres, de développer les outils d'analyse scientifique des données. Les deux projets principaux auxquels j'ai participé, SIGMA et INTEGRAL, étaient basés sur des systèmes à ouvertures codées. Ces systèmes sont relativement complexes et j'ai consacré une partie importante de mon activité de recherche au développement des outils d'analyse afférents. Donc en chapitre 2, avant de discuter les programmes proprement astrophysiques, je présenterais mes principaux travaux sur les systèmes à ouverture codée, qui ont été à la base du développement des systèmes d'analyse des données recueillies par SIGMA et INTEGRAL.

Enfin, en chapitre 5 je présenterais mes perspectives et mes projets futurs.

1.1 Trous noirs et astrophysique

Je présente ici une brève introduction sur les trous noirs eux mêmes, et sur les recherches astrophysiques concernant ces objets. Il ne s'agit pas d'un compte rendu exhaustif sur le sujet, il y a déjà de nombreuses œuvres qui traitent de ce thème, tant pour un public générique que pour les spécialistes. Les sous-chapitres qui suivent représentent surtout le prétexte pour situer mon travail et celui des équipes qui ont travaillé avec moi dans le contexte général et historique de ce domaine de recherche. Dans la dernière partie (sous-chapitre 1.3) je relate comme je suis parvenu à ce domaine de recherche et je trace les grandes lignes de mon activité.

Un **trou noir**, dans sa plus simple définition, est une région de l'espace-temps à l'intérieur de laquelle le champ gravitationnel est si intense qu'il empêche toute matière et tout rayonnement de s'échapper. Ce fut John Wheeler qui, en 1967, utilisa pour la première fois le terme de trou noir (*black hole*) pour ce type d'objet, mais la possibilité de leur existence avait déjà été évoquée presque 200 ans auparavant.

Un trou noir (ou mieux l'espace-temps qui l'entoure) est décrit par la solution des équations du champ gravitationnel de la relativité générale pour une masse sphérique isolée. Cette solution, valable pour une masse en l'absence de moment angulaire, a été trouvée par Karl Schwarzschild en décembre 1915, un mois seulement après la publication des équations de la relativité générale par Albert Einstein. Cette solution est très générale, ne dépend pas de la nature de l'objet mais

seulement de sa masse, et peut être utilisée pour décrire les phénomènes qui se produisent autour de tous objets sphériques massifs comme le soleil et les autres étoiles². Ces équations décrivent donc les géodésiques, les lignes d'espace temps suivies par tout rayonnement ou tout corps en mouvement autour de la masse en question. Les équations de la relativité générale permettent de prédire les effets (relativistes) de courbure de l'espace temps du à la distribution de masse, que les équations de Newton ne prévoient pas. Certains de ces effets, les plus célèbres étant l'avancement du périhélie de Mercure, la déflexion de la lumière des étoiles par le soleil et le décalage vers le rouge des raies spectrales, ont été observés déjà avant les années 1930, notamment par Arthur Eddington (un défenseur inconditionné de la théorie d'Einstein). Les équations de la relativité générale ont donc été vérifiées (jusqu'à un certain niveau de précision) dans le cas de champ gravitationnel faible.

Ces solutions prévoient pour chaque masse une dimension minimale critique en dessous de laquelle l'espace temps est si déformé qu'il empêche tout objet ou rayonnement de sortir de cette surface limite. Matière et rayonnement extérieurs peuvent par contre être capturés, traverser la surface critique et, en imaginant toute la masse concentrée en un point, s'effondrer en un temps fini dans la singularité centrale où les forces de marée divergent à l'infini. Le rayon critique (en l'absence de rotation) s'appelle le rayon de Schwarzschild (R_S) et il définit l'horizon des événements, à savoir la surface sphérique infranchissable par aucun signal ou particule dans le sens intérieur extérieur. R_S , calculé avec les équations de la relativité générale, est tout simplement donné par la valeur classique (Newtonienne) du rayon d'une masse M sphérique pour laquelle la vitesse d'échappement est égale à la vitesse de la lumière c , soit $R_S = 2 G M / c^2$, où G est la constante de la gravitation. Les équations complexes de la relativité générale donnent finalement (pour ce rayon) le même résultat que les concepts classiques de la physique Newtonienne, déjà utilisées par le révérend anglais John Michell et par le français Pierre Simon de Laplace à la fin du XVIII^e siècle pour formuler l'hypothèse que la lumière, supposée posséder une masse, pouvait être retenue par des objets suffisamment massifs et compacts.

Bien sûr la ressemblance avec la physique Newtonienne s'arrête là. Alors que le champ gravitationnel de la relativité générale loin de l'objet compact ressemble à celui décrit par Newton, il n'est pas de tout le même en s'approchant du trou noir. La lumière émise au niveau du rayon

² Schwarzschild avait trouvé aussi la solution analytique exacte pour l'intérieur de l'étoile dans l'hypothèse d'une densité constante. George Birkoff avait ensuite (1923) démontré que la solution de Schwarzschild externe était valable aussi pour des objets en expansion ou en contraction avec la seule condition d'être sphériques.

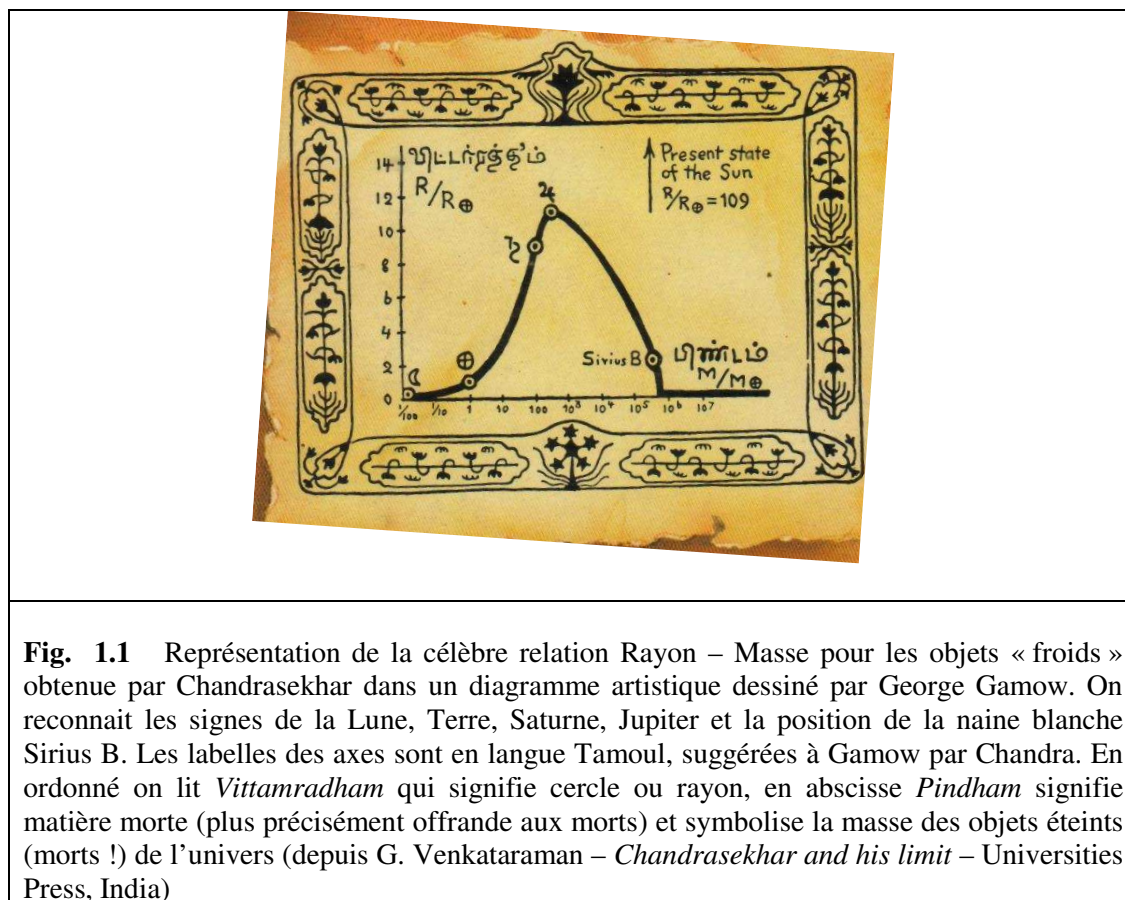
critique et en déca ne s'éloigne pas pour une certaine distance (comme un caillou depuis la terre) pour ensuite « retomber » sur l'étoile, mais elle suit tout simplement des géodésiques qui se dirigent vers l'intérieur de la surface critique. Le temps, mesuré par un observateur extérieur, se dilate en allant vers l'horizon jusqu'à devenir infini à la surface critique. Il s'ensuit un décalage vers le rouge (*redshift*) gravitationnel de la fréquence du rayonnement reçu à l'extérieur, qui devient lui aussi infini lorsque la radiation est émise au niveau même de la surface critique. Aucune lumière émise à l'horizon ne peut donc arriver à un observateur extérieur, pour qui le temps à l'horizon apparaît comme gelé. Pour un observateur qui plonge dans le trou noir, le passage de l'horizon s'effectue par contre en un temps propre fini, comme sa chute vers la singularité centrale où les forces de marée deviennent infinies.

A cause du terme en G/c^2 , on voit tout de suite que ce rayon critique est très petit et que seulement des objets extrêmement compacts peuvent s'approcher de cette limite. Pour un atome $R_S \sim 10^{-51}$ cm (un facteur 10^{-43} de sa dimension), pour la terre $R_S \sim 10^{-13}$ cm (10^{-9}), pour le soleil $R_S \sim 3 \cdot 10^5$ cm (10^{-6}) et pour une étoile à neutrons de une masse solaire (M_\odot) R_S est encore $\sim 3 \cdot 10^5$ cm, mais cette fois le facteur est seulement 0,1. En pratique, les densités à attendre sont tellement élevées que l'on peut espérer de les observer seulement dans des objets très massifs pour lesquels la gravitation domine les autres trois forces fondamentales de la physique. Cela porte tout naturellement vers l'astrophysique. La vérification de la relativité générale en condition de champ gravitationnel extrêmement intense et la preuve de l'existence des trous noirs passe par l'étude des astres de notre univers.

Dans les années 1920-1930, on avait réalisé le fait que la métrique de Schwarzschild donnait lieu à un horizon des événements et à des singularités³ mais, Einstein, Eddington et la plupart des physiciens refusaient d'admettre que des objets aussi extrêmes puissent effectivement exister. Pourtant des étoiles denses, compactes et froides, les naines blanches, étaient déjà connues et avec les toutes nouvelles lois de la mécanique quantique, on avait compris, grâce à Ralph Fowler en 1926, que le mécanisme qui empêchait leur effondrement était la pression de dégénérescence des électrons, résultat direct du principe d'exclusion proposé par Pauli en 1925 pour les fermions. De 1930 Subrahmanyam Chandrasekhar avait trouvé, sur le bateau qui l'amenait de Madras, aux Indes,

³ En effet, la métrique de Schwarzschild semblait prédire une singularité à R_S . Toutefois cette singularité n'est pas intrinsèque mais due au système de coordonnées. Finkelstein en 1958 (et Eddington avant lui) avait démontré qu'en changeant le système de coordonnées la singularité à R_S disparaissait.

à Southampton, en Angleterre, la limite supérieure de la masse d'une naine blanche ($\sim 1,4 M_{\odot}$) au de là de laquelle l'effondrement gravitationnel n'est plus contenue par la pression des électrons.



Ce résultat semblait suggérer l'existence des trous noirs, mais Eddington, comme l'ensemble des astronomes, refusaient de le considérer, lorsqu'en 1932 James Chadwick découvrit le neutron. Fritz Zwicky et Walter Baade formulèrent alors en 1934 l'hypothèse que des étoiles composées de neutrons (soutenues par la pression de dégénérescence des neutrons, qui sont aussi de particules avec spin donc des fermions) se forment par l'effondrement explosif (les supernovas) d'étoiles très massives. La formation d'étoiles à neutrons fut étudiée théoriquement par Lev Landau et Robert Oppenheimer. Ce dernier, avec George Volkoff, formula en 1939 la première estimation de la masse maximale des étoiles à neutrons, la limite d'Oppenheimer-Volkoff (quelques masses solaires), au-delà de laquelle la pression de dégénérescence des neutrons ne peut plus contrer la gravité. Cette masse limite dépend de l'équation d'état de la matière nucléaire à des densités très élevées ($> 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$), équation encore aujourd'hui mal connue dans ce régime, mais nous savons désormais que cette masse limite se situe entre 1,5 et 3,2 M_{\odot} (Rhoades & Ruffini 1974).

Ensuite, en 1939, Oppenheimer et Hartland Snyder étudièrent l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive idéale (parfaitement sphérique, sans pression, ni rayonnement ou rotation) et ont trouvé par voie analytique que la formation d'un trou noir était effectivement inévitable. L'étoile, lorsqu'elle s'effondre et s'approche de la surface critique, semblerait à un observateur extérieur ralentir et finalement se geler au rayon de Schwarzschild. Le *redshift* et la déflexion de la lumière empêchent bien sûr un tel observateur de constater ces effets. Par contre, pour un observateur solidaire avec elle, l'étoile dépasse la surface critique et continue son implosion jusqu'à une singularité centrale.

La seconde guerre mondiale et la course pour la réalisation de la bombe à hydrogène bloquèrent la recherche sur les trous noirs pendant 15 ans, mais dans la deuxième moitié des années 1950, l'intérêt resurgit et, avec les connaissances et les moyens de calcul que les physiciens avaient acquis dans les programmes de développement des armes nucléaires, ils furent en mesure de s'attaquer aux problèmes théoriques complexes posés par la physique des trous noirs. Tout d'abord John Archibald Wheeler calcula les propriétés des étoiles denses et froides qui ont épuisé le combustible nucléaire en confirmant les conclusions de Chandrasekhar et Oppenheimer–Volkoff. Ensuite, le groupe de Stirling Colgate, avec des simulations sur ordinateur, confirma aussi que les résultats d'Oppenheimer (l'implosion d'étoiles massives en trous noirs) étaient valables pour des cas réalistes. Des résultats similaires furent aussi obtenus par les chercheurs de l'Union Soviétique sous la houlette de Yakov Zeldovich et Igor Novikov.

En 1962, Roy Kerr publia la solution analytique des équations qui décrivent un trou noir en rotation. La métrique de Kerr montre que pour un trou noir en rotation, la symétrie n'est plus sphérique mais seulement axiale, l'horizon des événements se trouve plus proche de R_s , entre $\frac{1}{2} R_s$ (spin maximal) et R_s (spin 0). En effet, on a pu démontrer que le moment angulaire d'un trou noir ne peut pas dépasser une valeur maximale donné par $J = GM^2/c$, valeur pour laquelle le trou noir serait disloqué par la force centrifuge. La conséquence la plus intéressante de la métrique de Kerr est le phénomène du *frame dragging* (aussi appelé effet de Lense-Thirring) : un trou noir en rotation entraîne avec lui l'espace-temps à proximité de son horizon (à l'intérieur d'une surface ovale délimitée par la limite statique) en produisant un vortex d'espace-temps qui empêche un observateur extérieur proche de rester statique par rapport à un repaire lointain. La zone entre l'horizon et la limite statique s'appelle ergosphère car depuis cette région on peut en principe extraire de l'énergie de rotation du trou noir (voir par exemple Shapiro & Teukolsky 1983).

Entre 1965 et 1975, des résultats théoriques importants sur les propriétés des trous noirs ont été obtenus. Trois écoles ont contribué de façon significative à ces développements théoriques : celle animée par John Archibald Wheeler à Princeton (États Unis), celle de Dennis Sciama à Cambridge (Royaume Uni) et celle de Yakov Zeldovich à Moscou, URSS. L'histoire de la recherche sur les trous noirs est décrite d'une manière passionnante et suggestive par Kip Thorne (1994) qui montre comme cette recherche a été intimement liée au progrès de la physique et de l'astrophysique. On y apprend comme elle peut être (un peu schématiquement) résumée en deux contributions différentes. D'un côté, celle des théoriciens spécialistes de la relativité générale (les relativistes) qui se sont acharnés sur les équations d'Einstein pour comprendre les propriétés intimes des ces objets extrêmes. De l'autre côté, l'effort (pas toujours régulier ni planifié) de la communauté astrophysique pour la recherche et l'étude des trous noirs dans l'univers.

Je mentionne ici quelque'un des résultats théoriques essentiels. D'abord un trou noir est caractérisé seulement par sa masse, son moment angulaire et sa charge électrique (la charge électrique est probablement peu importante dans les systèmes réels et je n'en parlerais pas), c'est à dire (encore une expression de Wheeler) un trou noir n'a pas de cheveux (pas de champ magnétique, ni de aucune irrégularité de surface, etc.). Cela découle directement du théorème d'unicité du trou noir de Kerr : le trou noir de Kerr est la seule solution possible pour un trou noir dans le cadre de la relativité générale. Un trou noir n'est pas forcément de Kerr quand il se forme. S'il résulte de l'effondrement d'un objet hautement asymétrique avec des champs magnétiques, il réduit les déformations et les champs magnétiques et il se transforme en trou noir de Kerr très rapidement en rayonnant des ondes gravitationnelles et des ondes électromagnétiques. Après les premières conjectures formulées par Vitali Ginzburg, Zeldovich, Novikov et Andrei Doroshkevich, ces résultats ont été obtenus par Werner Israel (*no hair theorem* pour un trou noir de Schwarzschild), Richard Price (*every thing that can be radiated is radiated*), puis par Brandon Carter et David Robinson (extension à Kerr). Les trous noirs peuvent aussi pulser (Bill Press, 1971) mais on a pu démontrer (Saul Teukosky, 1973) que la pulsation et le spin ne peuvent pas se combiner pour disloquer le trou noir. Encor un fois, l'émission d'ondes gravitationnelles règle le système pour qu'il converge vers une solution de Kerr.

Après la découverte des quasars (avec leur jets collimatés) et des sources X, on a commencé à considérer les effets d'un trou noir de Kerr sur le disque d'accrétion. Roger Penrose en 1969 démontra qu'un trou noir de Kerr contient une énorme énergie de rotation. En 1975 James Bardeen et Jacobus Petterson ont démontré qu'un trou noir qui tourne rapidement déforme un disque

d'accrétion incliné par rapport au plan équatorial d'un trou noir : alors que le disque externe reste incliné, le disque intérieur est forcé de s'aligner perpendiculairement au spin du trou noir. Ensuite, Roger Blandford et Roman Znajek ont proposé un mécanisme efficace pour créer des jets de plasma en exploitant l'énergie de rotation d'un trou noir de Kerr entouré d'un disque d'accrétion.

En 1974, Stephen Hawking (suite à une suggestion initiale de Zeldovich) démontra que les trous noirs émettent eux aussi un rayonnement. C'est une radiation thermique de particules, photons et ondes gravitationnelles avec un spectre en énergie de corps noir, due aux effets quantiques qui se produisent à la surface de l'horizon. Cette radiation ne réduit la masse du trou noir que de très peu mais peut conduire à l'évaporation de trous noirs microscopiques. Dans ce cadre, Hawking a pu élaborer avec Bardeen et Carter une théorie thermodynamique des trous noirs en associant l'entropie d'un trou noir à la surface de l'horizon. Par la suite, les efforts théoriques se sont concentrés sur le problème de la singularité centrale. Une contribution majeure à ce sujet a été fournie par Penrose (1965) qui a d'abord établi le théorème selon lequel la singularité est une conséquence incontournable de la propriété attractive de la gravitation et donc la formation d'une singularité est inévitable lors de l'effondrement gravitationnel d'une étoile en trou noir. En 1969, Lifschitz, Khalatnikov, and Belinsky ont montré que la gravité de marée oscille de façon chaotique près de la singularité et ils ont identifié un type particulier de singularité appelée singularité BKL. Ensuite, Penrose énonça la conjecture de la censure cosmique selon laquelle il n'existerait pas de singularité nue, privée d'un horizon d'événements, capable de la couper, dans le sens de la causalité, de notre univers. Cette conjecture n'est pas pourtant encore démontrée.

Toutefois, les outils mathématiques et physiques disponibles ne suffisent plus pour explorer le sujet de la singularité, car à l'échelle de Planck il est nécessaire de coupler la gravitation et la théorie quantique, ce qui n'est pas encore réalisé. L'exploration théorique des trous noirs tient donc aujourd'hui de plus en plus aux théories physiques de l'unification de forces fondamentales.

Quelle est la situation de la recherche astrophysique des trous noirs ? Quarante-dix ans après la prédiction relativiste des trous noirs, les efforts pour prouver leur existence et mesurer les effets relativistes que la théorie de la relativité générale prédit dans leur voisinage restent d'actualité, car ces effets n'ont pas encore été mis en évidence de façon certaine. À part les trous noirs qui pourraient être nés dans une phase primordiale de l'univers (avec une masse quelconque, dont les spécimens microscopiques qui pourraient être sujets à l'évaporation), il y a deux classes de trous noirs dont nous pouvons modéliser les conditions de leur formation. L'une, comme nous l'avons vu,

comprend les trous noirs de masse stellaire ($1-100 M_{\odot}$), à rechercher parmi les restes compacts des étoiles massives aux stades ultimes de leur évolution. L'autre classe inclut les spécimens supermassifs ($10^6 - 10^{10} M_{\odot}$), tapis dans les noyaux galactiques et produits par accréation, par dynamique stellaire ou par collision de galaxies. Alors que les trous noirs de masse stellaire avaient été prédits avant leur découverte, les trous noirs supermassifs l'ont été seulement après la découverte des radiogalaxies et surtout des quasars⁴ dans les années 1960, pour expliquer les énormes luminosités, les courtes variations temporelles et les jets collimatés de particules accélérées observés dans ces sources.

La recherche observationnelle des trous noirs ne se limite pas à la simple question de prouver leur existence et de définir leurs propriétés individuelles. D'un point de vue plus spécifiquement astrophysique, on aimerait aussi comprendre comment les trous noirs peuvent se former dans le cadre de l'évolution stellaire et des systèmes binaires, quelle est leur distribution dans la Galaxie, quels sont leurs effets sur la dynamique et l'évolution des galaxies. L'étude des spécimens supermassifs dans les centres galactiques amène aussi à une série de questions, certaines relevant de l'évolution cosmologiques : les trous noirs géants se sont-ils formés avant ou après les galaxies elles-mêmes ?

Si un trou noir est invisible, par définition, il peut par contre être révélé par les effets qu'il produit sur le rayonnement ou sur la matière qui l'entoure et notamment par le rayonnement que cette matière émet lorsque elle est capturée et pendant sa chute vers l'horizon (accréation). L'autre possibilité est la détection des distorsions de l'espace temps qui se produisent dans les cas de perturbations de type non sphériques (comme la coalescence de deux trous noirs), et qui se propagent sous la forme d'ondes gravitationnelles.

La détection d'ondes gravitationnelles est d'une importance majeure et c'est l'un des défis de l'astrophysique du XXI^e siècle. Pour le moment, elles n'ont pas été détectées directement. Leur existence a été démontré par Russel Hulse et Joseph Taylor avec la découverte d'un système orbitale double de deux étoiles à neutrons (le pulsar PSR 1513-16) qui se rapprochent en raison de l'émission d'ondes gravitationnelles. Je me limiterai par la suite à considérer le phénomène de

⁴ Plus que la découverte radio du premier quasar 3C48 en 1960 par T. Mathews, H. Palmer et A. Moffett et son identification et spectroscopie optique par A. Sandage, c'est l'interprétation du spectre de 3C 273 (décalage vers le rouge et donc mesure de distance) par Maarten Schmidt en 1963 qui a été crucial pour la thèse des trous noirs supermassifs.

l'accrétion sur les trous noirs et plus particulièrement dans les systèmes galactiques (sur les preuves astrophysiques de l'existence des trous noirs en général, voir par exemple Celotti et al. 1999).

1.2 Accrétion sur les trous noirs et émission à haute énergie

En 1964, Zeldovich et Salpeter proposèrent indépendamment que l'accrétion de matière interstellaire par un trou noir peut produire de l'émission dans le domaine des rayons X et rendre compte des énormes luminosités mesurées dans les quasars. En 1966, Novikov et Zeldovich formulèrent l'idée que l'accrétion pouvait se dérouler dans un système binaire composé d'un objet compact et une étoile normale, alors que Shklovskii fut le premier en 1967 à proposer clairement d'associer la première des nouvelles sources X (Sco X-1) avec une étoile à neutrons accrétant la matière d'une étoile compagne (l'étoile secondaire) dans un système binaire serré. La formation d'un disque d'accrétion dans les systèmes binaires serrés à cause du moment angulaire du gaz accrété, fut considéré par Predengast et Burbige (1967), alors que Lynden-Bell (1969) reconnaissait l'importance du disque d'accrétion autour des trous noirs massifs dans les noyaux des galaxies et, avec Rees (1971), envisageait la présence d'un trou noir massif au centre de notre propre galaxie (voir chapitre 4). La théorie du disque d'accrétion autour d'objets compacts fut développée peu après par Pringle et Rees (1972), Shakura et Sunyaev (1973) et, en tenant compte des effets relativistes, par Novikov et Thorne (1973) et Page & Thorne (1974).

L'accrétion de matière dans un objet compact est un processus très efficace pour extraire de l'énergie potentielle (voir Frank, King & Raine, 1995). Dans le cas des étoiles à neutrons (masse $M \sim M_{\odot}$, rayon $R \sim 10$ km) ou de trous noirs stellaires, l'efficacité du processus est en principe de l'ordre de 10% de la masse accrétée alors que la fusion nucléaire libère au maximum $\sim 0,7$ % de la masse au repos. L'efficacité dépend du facteur de compacité M/R . Pour les naines blanches, par exemple ($M \sim 1 M_{\odot}$, rayon $R \sim 10^9$ cm), elle est inférieure à celle des processus nucléaires, même si l'accrétion joue un rôle très important dans les systèmes binaires avec naines blanches (les variables cataclysmiques, les novas, les supernovas de type Ia). L'énergie libérée ($GM\dot{M}/R$) peut être transformée en rayonnement. Pour un facteur de compacité donné, la luminosité du système dépend alors du taux d'accrétion \dot{M} . On appelle luminosité d'accrétion la quantité $L_A = GM\dot{M}/R$, qui représente la luminosité potentielle du système. A cause de la pression de radiation sur la matière accrétée, on peut établir, dans le cas d'une émission isotrope et d'une accrétion sphérique et

continue, une luminosité maximale pour le système, la luminosité d'Eddington donnée par $L_E = (4\pi GM m_p c / \sigma_T) = 1,3 \cdot 10^{38} (M/M_\odot) \text{ erg s}^{-1}$, où m_p est la masse du proton et σ_T la section efficace de Thompson).

Pour établir le type de spectre en énergie de la radiation émise, on peut déterminer une température minimale de rayonnement, celle qui prévaudrait si l'objet émettait comme un corps noir, soit $T_B \sim (L_A / 4\pi R^2 \sigma_T)^{1/4}$, et une température maximale, dans l'hypothèse où toute l'énergie libérée est transformée en énergie thermique, soit $T_{Th} \sim (GMm/R)/(3k)$ (ou k est la constante de Boltzman). Pour une étoile à neutrons ou un trou noir on trouve que la température (kT) est alors comprise entre $\sim 1 \text{ keV}$ et $\sim 50 \text{ MeV}$. Les fréquences typiques du rayonnement d'un objet compact de type étoile à neutrons ou trou noir accrétant se situent donc dans les bandes X et gamma du spectre électromagnétique. Bien évidemment, le mécanisme d'émission (Rybicky & Lightman 1979, Longair 1994) à l'œuvre et les spectres que l'on observe sont complexes (Frank et al. 1996, et les chapitres 3 et 4) mais il est clair que le domaine de l'astronomie X et gamma est crucial pour l'étude de ces objets.

La première source X extrasolaire (Sco X-1) avait été découverte en 1962 par Giacconi et al. (1963), une découverte suivie par plusieurs autres (~ 30 sources en 1967). Mais la première identification d'une de ces sources (Cyg X-1) avec un système binaire (parallèlement à la découverte d'éclipses dans Cen X-3, voir chapitre 2) a été réalisée en 1972 par Webster et Murdin et par Bolton. La source Cyg X-1 avait été découverte par Friedman et collaborateurs en 1964 et l'erreur sur sa position avait été réduite avec le premier satellite X, Uhuru, en 1971 (voir chapitre 2) et grâce à des observations radio. Les observations spectroscopiques dans le visible qui suivirent révélèrent une étoile massive en mouvement orbital ($\sim 5,6$ jours) autour d'un objet sombre et compact. A partir de la fonction de masse⁵ du système et des estimations sur la masse de l'étoile, la masse de l'objet compact fut estimée à plus de $3 M_\odot$, donc très probablement un trou noir. La plupart des autres sources X ont par contre été associées à des systèmes avec une étoile à neutrons. Les étoiles à neutrons suscitent des signatures précises : la variabilité périodique de l'émission X (la même cohérence observée dans les pulsars radio) ou l'émission de sursauts X caractéristiques (appelés de type I). La pulsation indique la présence d'un fort champ magnétique (qui canalise les particules vers les pôles de l'étoile) et donc elle prouve qu'il ne s'agit pas d'un trou noir (les trous

⁵ La fonction de masse est définie par $F(M) = M_1^3 \sin^3 i / (M_1 + M_2)^2$, où M_1 est la masse de la primaire, M_2 celle de la secondaire et i est l'angle d'inclination, entre l'axe du système et la ligne de visée. La $F(M)$ est liée aux paramètres orbitaux (l'amplitude de la vitesse radiale K_2 de la secondaire et la période orbitale P) par $F(M) = K_2^3 P / (2\pi G)$

noirs n'ont pas de cheveux). Les sursauts X sont dus à la fusion thermonucléaire explosive de couches de matière accumulées par accréton à la surface de l'objet compact. Un trou noir n'a pas de surface et donc la encore c'est une étoile à neutrons, faiblement magnétisée, qui produit ce genre d'éruptions.

Il n'est pas évident par contre de distinguer un trou noir accrétant d'une étoile à neutrons dans un système binaire. L'émission d'un trou noir n'a pas de caractéristiques aussi spécifiques que celle d'une étoile à neutrons. C'est bien pour cela que près de 40 ans après la découverte du premier système binaire à trou noir, nous ne sommes pas encore tout à fait certains qu'il contient un trou noir. Toutefois, les évidences s'accumulent et il est désormais difficile dans certain cas d'envisager une solution alternative viable à la présence d'un trou noir. Les cas les plus saillantes sont sûrement ceux des sources X transitoires GS 2023+338 et GRS 1915+105 (fonction de masse de $\sim 6 M_{\odot}$ et $\sim 9 M_{\odot}$ respectivement) et celui de Sgr A^{*}, le trou noir supermassif de $3.6 \cdot 10^6 M_{\odot}$ au centre de notre galaxie.

Les progrès obtenus depuis les premières observations X de Cyg X-1 sont énormes, grâce à la série d'observatoires X et gamma qui ont été lancées pour observer (entre autres sources) les trous noirs. L'ensemble des données observationnelles recueilli nous donne maintenant une vision complexe des ces systèmes (qui sera partiellement résumé en chapitre 3 et 4). Une des caractéristiques des systèmes binaires suspectés de contenir un trou noir est qu'ils présentent des spectres X durs, avec le maximum d'énergie qui pique vers 100-200 keV, et qui se prolongent dans la bande des gammas mous (100-1000 keV).

Depuis 1990 (lancement du télescope SIGMA) je travaille donc dans le domaine des hautes énergies pour détecter et caractériser l'émission X et gamma des trous noirs galactiques.

1.3 Activité de recherche sur les trous noirs : origine, histoire et évolution

Ma contribution (et celle des chercheurs qui j'ai encadrés) au thème de recherche sur les trous noirs concerne le volet de l'exploration astrophysique observationnelle de ces objets. Elle tient plus spécifiquement à la recherche et à l'étude des trous noirs par le moyen d'observations astronomiques et notamment par l'étude de l'émission de haute énergie des systèmes galactiques censés contenir des trous noirs accrétants.

Je dois avouer que je suis arrivé à l'étude des trous noirs, poussé plus par les données que par un choix réfléchi sur l'importance de ce domaine de recherche ou par une formation de *relativiste*. Je me considère plutôt formé à l'école italienne des rayons cosmiques et de l'astrophysique des hautes énergies, initiée par le physicien Giuseppe Occhialini, qui créa l'institut de physique cosmique à Milan (l'ancien IFCTR/CNR), et dont mon directeur de thèse en Italie a été l'étudiant. Pour l'histoire (voir par exemple Bignami 2006), Beppo Occhialini a eu un rôle non négligeable dans le développement des programmes d'astrophysique des hautes énergies en Europe, s'agissant notamment de l'astronomie gamma.

Je retrouve d'ailleurs dans l'histoire une certaine justification de ce parcours. Kip Thorne (1993) explique de façon lucide que les découvertes observationnelles clefs sur les trous noirs n'ont pas été réalisées, ni même envisagées, et encore moins sollicitées par les *théoriciens relativistes* (ceux mentionnés en chapitre 1.1) qui ont développé la théorie des trous noirs. Seule l'école russe dirigée par Yakov Zeldovich (et fortement influencée par Lev Landau) avait su combiner les études théoriques des trous noirs avec une exigence constante de recherche d'une preuve observationnelle dans le domaine astrophysique. Certes, la découverte des trous noirs n'a pas été le résultat du programme scientifique soviétique. Mais c'est plus dû au cadre politique et stratégique (course aux armements et conquête spatiale) qu'à un défaut de volonté. La chose curieuse, selon Thorne, c'est que finalement c'était bien la reprise du programme nucléaire soviétique en 1961 qui a poussé les américains à financer le programme de lancement sur fusées de détecteurs X pour contrôler les tests nucléaires russes depuis l'espace. C'est bien à partir de ce programme qu'on allait découvrir les sources X célestes. Et finalement ce fut bien Riccardo Giacconi (prix Nobel 2002), étudiant de Occhialini, héritier de l'école italienne des rayons cosmiques, qui découvrit sous la poussée de Bruno Rossi (autre italien au MIT, grande figure de la physique des rayons cosmiques) les sources X en 1962 (voir Giacconi & Tucker 1985).

J'ai donc rejoint la communauté des astrophysiciens spécialistes des trous noirs avec ma participation au projet SIGMA/GRANAT, un projet franco-soviétique avec participation bulgare et danoise. Les collègues russes étaient dirigées par Rashid Sunyaev, ancien étudiant de Zeldovich, et célèbre pour les nombreux résultats qu'il a obtenus dans le groupe de Moscou. Dans le projet, les partenaires russes, sous la direction scientifique de l'institut des recherches spatiales (IKI) de Moscou, ont fourni la plateforme (GRANAT) et le lanceur (PROTON), les instituts français de Saclay et du CESR de Toulouse étaient, sous la maîtrise d'œuvre du CNES, en charge de

l'instrument principale, le premier télescope à rayons X durs et gamma mous basé sur une optique révolutionnaire (voir chapitre 2). Je n'ai pas moi même rencontré Zeldovich (mort en 1987), mais Jacques Paul (1998) relate comment, encore une fois il avait vu juste, c'est bien à lui que l'on doit l'engagement russe dans le projet. Il avait compris l'intérêt du programme proposé par les scientifiques français (Jacques Paul du CEA et Pierre Mandrou du CESR en tête) et le CNES, et c'est bien lui qui convaincrà en 1984 l'Académie des Sciences de l'URSS de donner la priorité au programme GRANAT sur les projets d'astronomie ultraviolette. SIGMA s'est révélé ensuite être une formidable machine pour la chasse aux trous noirs galactiques.

Quelque mois avant le lancement, nous avons tenu une réunion avec nos collègues soviétiques pour réfléchir au programme d'observations. Sunyaev nous avait montré le spectre d'une source de la classe des novas X (il s'agissait de Nova Vulpeculae) obtenu avec l'instrument TTM (un instrument X monté sur la station spatiale MIR) qui montrait une émission qui s'étalait jusqu'à 30 keV avec un spectre dur. Rashid n'avait pas des doutes : il s'agissait selon lui d'un trou noir. J'étais sorti de cette rencontre avec deux convictions. Ces sources, les *X-ray Novae*, étaient extrêmement intéressantes. Par contre comme elles sont transitoires, il ne faut pas les rater quand elles entrent en éruption. Il nous fallait donc exploiter au maximum l'énorme champ de vue du télescope pour optimiser notre chance de les détecter et les étudier (chapitre 2). De surcroît, leur positionnement fin était essentiel pour déclencher des observations dans le visible qui pouvaient nous fournir l'estimation de la masse de l'objet compact.

Quand en janvier 1991 une nouvelle source brillante et très dure apparue dans la constellation de la Mouche, alors que j'étais à la station de réception d'Evpatoria en Crimée pour suivre les opérations du télescope SIGMA, je n'avais pas oublié Nova Vulpeculae. Je savais de quoi il s'agissait et qu'il fallait l'étudier à fond. Rentré à Saclay, j'avais analysé les données rapidement, j'avais approfondi mes connaissances sur les novas X et les systèmes binaires X a trous noirs, j'avais rédigé un papier avec la conclusion que la source était un nouveau et magnifique candidat trou noir et qu'elle montrait une émission à haute énergie. Avec les travaux sur le microquasar 1E 1740.7-9242 et la découverte de la source GRS 1758-258, ce fut un des mes premiers travaux sur les trous noirs galactiques, le début d'une quête passionnante et fructueuse.

Ma contribution à ce domaine de recherche, entre les années 1990 et 2005, peut se décliner en trois parties différentes :

- Contribution à la définition et à l'analyse des données de télescopes spatiaux pour la détection de rayons X durs et gamma mous. En particulier, j'ai participé en premier ligne à la mise en œuvre du système d'analyse des données de deux projets clefs de l'astronomie gamma européenne des années 1990 et 2000 les missions SIGMA/GRANAT et INTEGRAL.
- Etudes de l'émission X dur et gamma mou (20-1000 keV), le plus possible couplée à des données X (0,1-10 keV) et même à d'autres longueurs d'onde (radio, visible, infrarouge), des systèmes binaires X galactiques soupçonnées contenir un trou noir de masse stellaire. En particulier, j'ai exploré les systèmes transitoires qui présentent de larges excursions en taux d'accrétion et en luminosité.
- Recherche et étude de l'émission X, X dur et gamma mou depuis le trou noir supermassif au centre de la Galaxie.

Les trois volets sont présentés par la suite dans les chapitres 2, 3 et 4 respectivement et, pour chacun, j'ai choisi un minimum de trois articles significatifs pour illustrer le programme de recherche que j'ai conduit avec mes étudiants et collaborateurs.

Bibliographie

- Bignami, G. F., 2006, *Explorer l'espace pour remonter le temps*, Odile Jacob, Paris
- Bolton, C. T., 1972, Nat, 235, 271
- Celotti, A., Miller, J. C. & Sciama, D. W., 1999, Class. Quant. Grav. 16, A3
- Frank, J., King, A. & Raine, D., 1995, *Accretion Power in Astrophysics*, Cambridge Univ. Press
- Giacconi, R. H., et al., 1963, Phys. Rev. Lett. 9, 439
- Giacconi, R. H., et al. 1971, ApJ, 167, 67
- Giacconi, R. H. & Tucker, W., *The X-ray Universe*, 1985, Harvard Univ. Press, Cambridge
- Longair, M. S., 1994, *High Energy Astrophysics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge
- Lynden-Bell, D., 1969, Nat, 223, 690
- Lynden-Bell, D. & Rees, M. J., 1971, MNRAS, 152, 461
- Novikov, I. D. & Zeldovich B. Y., 1966, Il Nuovo Cimento, 4, 810
- Novikov, I. D. & Thorne, K. S., 1973, *Black Holes*, C. De Witt & B. De Witt ed., Gordon & Breach, New York
- Page, D. N. & Thorne, K. S., 1974, ApJ, 191, 499
- Paul, J., 1998, *L'homme qui courait après son étoile*, Odile Jacob, Paris
- Prendergast, K. H. & Burbidge, G. R., 1968, ApJL, 151, L83
- Pringle, J. E. & Rees, M.J., 1972, A&A, 21, 1
- Rhoades, C. E. & Ruffini, R., 1974, Phys. Rev. Lett. 32, 324
- Rybicki, G. B. & Lightman, A. P., 1979, *Radiation Processes in Astrophysics*, A. Wiley, New York
- Salpeter, E. E., 1964, ApJ, 140, 796
- Segrè, E., 1976, *Personaggi e scoperte della fisica contemporanea*, Mondadori, Farignana
- Shakura, N. I. & Sunyaev, R.A., 1973, A&A, 24, 337
- Shapiro, S. L. & Teukolsky, S.A., 1983, *Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars: The physics of Compact Objects*, Wiley, New York
- Shlovsky, I. S., 1967, ApJ, 148, L1
- Thorne, K. S., 1994, *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, Norton & C., New York
- Zeldovich, B. Y, 1964, Soviet Phys Dokl, 9, 246
- Webster, B. L., & Murdin, P., 1971, Nat, 235, 37

2. Les télescopes à masque codé

Etudier les trous noirs galactiques à haute énergie est un propos très noble mais il faut encore s'en donner les moyens. Dans les années 1980 le prototype des trous noirs stellaires, Cyg X-1 était connu pour avoir (dans son état standard) un spectre particulièrement dur, qui s'étalait dans des régions spectrales encore peu explorées, vers quelques centaines de keV (voir par exemple Liang & Nolan 1984). Or, cette source était la deuxième source plus brillante du ciel dans ce domaine d'énergie (après la nébuleuse du Crabe) et on se doutait bien que d'autres trous noirs similaires auraient été détectés si on avait disposé d'instruments adaptés. Le besoin d'augmenter la sensibilité et la résolution angulaire des télescopes gamma était très ressenti. On arrivait à une minute d'arc avec les télescope à incidence rasante employés sur les observatoires Einstein (1978-1981) et EXOSAT (1983-1986) alors qu'au delà de 10 keV on ne pouvait atteindre, au mieux, qu'un degré de résolution.

Après le célèbre Uhuru (1970-1973), sept petits satellites avaient été mis en orbite entre 1970 et 1977: les américains OAO-3, OSO 7, OSO 8, Vela-5A, SAS 3, le satellite néerlandais ANS, et l'anglais Ariel 5, avant qu'une nouvelle grande expérience soit lancée par la NASA : HEAO 1 (1977-1979). C'est HEAO 1 qui, pour la première fois réalisa un balayage complet du ciel dans la bande des X durs et gamma mous (jusqu'à 10 MeV). En particulier, l'expérience A4 avait permis de publier un catalogue de plus de 40 sources actives dans la bande 13-180 keV (Levine et al. 1984), mais la résolution ($\sim 1^\circ$ à 2°) et la sensibilité restaient très limitées. Le satellite HEAO 2 (l'observatoire Einstein) avait réalisé une révolution dans le domaine des basses énergies (< 4 keV), confirmé par EXOSAT et puis encore par ROSAT (< 2 keV) en détectant plus de 200.000 sources X (pour une histoire des missions d'astronomie X jusqu'à ~ 1992 voir Bradt et al. 1992). Pouvait-on espérer réaliser une révolution comparable dans le domaine des rayons X durs et rayons gamma ? Les systèmes utilisés dans ce domaine étaient basés sur des collimateurs fixes ou rotatifs. Une nouvelle technique pourtant était apparue. L'idée était d'utiliser une camera à épingle (*pinhole camera*) dans laquelle on aurait multiplié le nombre de trous.

2.1 Imagerie gamma avec les télescopes à masque codé

Au-delà de quelques dizaines de keV, les techniques de focalisation par miroir à incidence rasante ne sont plus applicables (mais voir chapitre 5). Dans les années 1970-1980, des dispositifs optiques basés sur des ouvertures codées avaient été proposés (voir Caroli et al. 1987). Ces systèmes emploient un ensemble d'éléments opaques et transparents (masque) chargé de moduler le rayonnement avant sa détection par un détecteur sensible à la position d'interaction du photon (caméra gamma). La disposition des éléments opaques peut être optimisée afin de permettre une reconstruction correcte des images du ciel à partir des images enregistrées par le détecteur. En quelque années (1976-1981), après que le principe de multiplier (en manière aléatoire) les « trous » dans une *pinhole camera* (camera à épingle) eut été formulé (Dicke 1968), grâce à des auteurs comme Gunson et Polychronopoulos (1976), Proctor, Skinner et Willmore (1979), Fenimore et Cannon (1978) et Miyamoto (1977), des motifs spécifiquement adaptés à l'imagerie avaient été identifiés pour réaliser des télescopes gamma. D'une manière ou d'une autre, ils étaient tous basés sur les séries binaires nommées *Cyclic Different Sets* (Baumert 1971). Les motifs bidimensionnels proposés (dont les motifs URA qui seront mentionnés dans la suite) ont la remarquable propriété d'avoir leur fonction d'auto corrélation égale à une fonction delta de Kronecker. Une telle propriété assure bien évidemment une réponse spatiale optimale. Une simple corrélation de l'image enregistrée par le détecteur avec un tableau dérivé du motif de masque donne un pic à la position de la source avec des lobes secondaires plats. Il s'ensuit une réponse angulaire d'appareil, après deconvolution, (SPSF, pour *System Point Spread Function*) optimale (voir les introductions des deux articles en fin de chapitre). La largeur du pic étant définie par la largeur des trous (élément transparents) dans le masque et de la distance masque détecteur, il était possible d'obtenir une bonne résolution angulaire, et cela sans réduire (comment l'aurait fait un collimateur étroit) la sensibilité qui dépendait seulement du nombre d'éléments transparents et des caractéristiques du bruit. Dans le domaine gamma (dominé par le fond instrumental) la fraction optimale d'éléments ouverts est de 0,5 et donc la surface utile du détecteur était la moitié de sa surface physique.

Les premiers à employer vraiment de tels systèmes optiques pour l'astronomie des hautes énergies avaient été les anglais de Birmingham vers la moitié des années 1970, avec l'expérience sur fusée SL 1005 (Proctor et al. 1978, Proctor et al. 1979). Ensuite le groupe de Prince à Caltech (US) (Cook et al. 1984) avait proposé un système de masque rotatif pour une expérience gamma sur ballon (GRIP). Une première utilisation sur satellite avait été celle de XRT sur Spacelab 2 (8 jours de vol

en 1985), réalisée par les anglais de Birmingham, mais seulement dans le domaine des rayons X d'énergie < 30 keV (Skinner et al. 1987). En Europe, suite au succès de COS B (50 MeV – 10 GeV) l'astronomie gamma était un des domaines d'excellence et les laboratoires songeaient à une grande mission d'astronomie gamma dévolue au domaine presque inexploré des X durs et des gamma mous, domaine de référence pour l'astrophysique des trous noirs et l'astrophysique nucléaire.

2.2 Les masques HURA et le projet GRASP

Lors de mon séjour post doctoral à l'université de Southampton, Angleterre, en 1987-1988, j'ai étudié les techniques d'imagerie par télescope à ouverture codée dans le cadre du projet GRASP (*Gamma Ray Astronomy with Spectroscopy and Positioning*), un télescope gamma (100 keV - 10 MeV) qui était alors en phase d'étude dans le cadre des programmes de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). On peut considérer GRASP comme le précurseur de la mission INTEGRAL.

Au sein de l'équipe de Southampton, j'ai donc mené, en collaboration avec un doctorant (Kevin Byard) :

- des études sur la théorie mathématique des systèmes optiques à ouverture codée,
- l'étude des techniques de décodage d'images et le développement des logiciels correspondants,
- des simulations numériques et des tests de laboratoire pour valider le concept de masque pour GRASP et les outils d'analyse afférents

Je me suis consacré à l'optimisation du système optique de GRASP qui prévoyait (dans ses versions initiales) un masque codé de type HURA (*Hexagonal Uniformly Redundant Array*) capable par rotation de 60° de produire un motif de masque complètement antisymétrique à celui de départ. Cette propriété était alors reconnue comme un élément essentiel pour pouvoir soustraire le fond correctement. Ce travail m'a permis de me familiariser avec la technique de déconvolution des images et en particulier de commencer à m'occuper des problèmes de reconstitution d'images avec des pixels discrets (Byard et al. 1990). Pour valider les résultats des simulations nous avons monté une expérience avec un masque HURA rotatif en utilisant une caméra gamma du département de radiologie de l'hôpital de Southampton (Goldwurm et al. 1990). Ensuite, le masque rotatif de GRASP a été abandonné en faveur d'une technique de re-pointage, dite de *dithering* (toutefois le motif HURA a été retenu pour le masque du spectromètre SPI du projet INTEGRAL).

2.3 L'analyse des données SIGMA : champ partiellement codé et analyse fine

À la fin de 1988, j'ai eu l'opportunité de poursuivre ce type de travail au sein de l'équipe du CEA/Saclay en charge de SIGMA (Système d'Imagerie Gamma à Masque Aléatoire), le premier télescope gamma de basse énergie (40-1300 keV) à ouverture codée sur satellite, mis en orbite le 1^{er} décembre 1989 sur la plate-forme russe GRANAT (Paul et al. 1991). Avec sa gamma caméra, un cristal circulaire de NaI(Tl) de 1,25 cm d'épaisseur, 57 cm de rayon, vue par 61 photomultiplicateurs, dérivée de celles utilisées en médecine nucléaire et son masque codé de type URA à éléments de tungstène, SIGMA offrait un pouvoir séparateur de $\sim 15'$ sur un champ de vue de $4^\circ \times 4^\circ$ si l'on s'en tient à sa partie totalement codée (zone où le rayonnement des sources est entièrement modulé par le masque). En effet, la modulation partielle réduisant les propriétés optimales de réponse, les sources dans le champ partiellement codé étaient considérées plutôt comme du bruit.

Après avoir développé le logiciel standard d'analyse du champ totalement codé (*Fully Coded Field of View*, FCFOV), j'ai développé les algorithmes pour étendre l'analyse à l'ensemble du champ de vue, y compris le champ partiellement codé (*Partially Coded Field of View*, PCFOV). Cette extension de la déconvolution, qui apparaît maintenant tellement naturelle, ne l'était pas au début même du programme. On songeait à analyser (pour les soustraire) les sources partiellement codées en utilisant le fantôme qu'elles produisent dans le champ totalement codé. C'était en principe possible mais cette procédure empêchait de nettoyer et de sommer les images et donc d'optimiser les résultats d'observations répétées de la même région. J'étais persuadé qu'il fallait arriver à exploiter l'ensemble du champ de vue. L'implémentation de la déconvolution n'était pas banale, car, à cette époque, on ne disposait pas de logiciels sophistiqués de traitement, par exemple les transformées de Fourier rapides (FFT) dans les bibliothèques mathématiques disponibles étaient limitées à dimensions données par puissance en base 2 ($= 2^n$ avec n entier). Le masque de SIGMA était du type URA avec pour dimensions sur les deux axes, deux nombres premiers 31×29 . Pour développer des algorithmes rapides de reconstruction d'image du ciel, j'avais donc dû utiliser les propriétés de symétrie des masques URA. Il fallait aussi tenir compte des dérives du satellite et donc implémenter une sorte de pondération visant à tenir compte des différents temps d'illumination des diverses zones du masque. Bien sûr une première déconvolution n'est pas satisfaisante parce que, les sources du champ partiellement codé produisaient des lobes secondaires (fantômes) qui imitaient des sources plus faibles (voir Fig. 2.1 et 2.2). J'ai donc mis en place des

algorithmes d'analyse et de nettoyage des images capables de repérer les sources ponctuelles, de les modéliser et de retirer leurs lobes secondaires de l'image. Avec l'aide de Jean Ballet, j'ai mis en place l'ensemble de l'analyse scientifique des données SIGMA à Saclay. Les figures 2.1 et 2.2 montrent des images SIGMA (avant et après déconvolution et nettoyage) de la nébuleuse du Crabe (Crabe), pour illustrer les différentes étapes de la reconstruction d'images.

Il fut ainsi possible d'exploiter d'une façon optimale la totalité du champ de vue du télescope ($18^\circ \times 18^\circ$). Le champ de vue du télescope ainsi considérablement agrandi (par un facteur 9) permit en effet de détecter et d'étudier des nouvelles sources transitoires. Nous avons exploité cette propriété du télescope en particulier dans l'étude des sources transitoires appelées novae X (voir chapitre 3) et dans le balayage de la région du bulbe galactique, riche en systèmes binaires transitoires et en sources persistantes.

L'autre élément original de mes développements d'analyse des données SIGMA a été l'analyse fine des sources ponctuelles à partir des images déconvoluées. Le problème qui semblait hanter les images d'un système à masque codé avec plusieurs pixels détecteur par élément de masque, résultait du fait que les pixels de l'image de sortie sont très corrélés entre eux. En effet, chaque pixel de l'image ciel est reconstruit à partir de tous les pixels du plan détecteur. L'application d'une procédure d'ajustement par la méthode des moindres carrés ne semblait pas très correcte du point de vue purement statistique. D'autre part on pouvait démontrer qu'en utilisant une corrélation un peu particulière, qui pour chaque pixel de ciel utilise seulement une partie des pixels du détecteur, et que l'on appelle déconvolution delta (Fenimore & Cannon 1981), les pixels dans l'image ciel reconstituée sont quasi indépendants. Cette propriété provient du fait que, dans cette procédure, les vecteurs pour les quels les pixels détecteur sont multipliés avant d'être sommés, sont presque orthogonaux entre eux, donc le niveau de corrélation est très faible. Puisque l'on peut décrire la SPSF par la convolution d'une fonction pyramidale et une gaussienne qui exprime l'étalement de la réponse de la caméra gamma, convolution que j'ai calculée avec ses dérivées partielles et exprimée par une fonction analytique (voir l'annexe de notre papier Bouchet et al. 2001, pour les formules qui décrivent la SPSF du système SIGMA), j'ai pu développer des routines qui opèrent un ajustement par la méthode des moindres carrés entre l'image delta-déconvoluée et la SPSF (voir figure 2 de la publication n°. 1). Ces routines calculaient aussi les erreurs formelles sur les paramètres du *best fit* avec la méthode classique du calcul de la matrice Hésienne (Press et al. 1992).

Un de paramètres fondamentaux de la SPSF est la résolution de la caméra gamma (exprimé par la largeur de la gaussienne). En laissant libre ce paramètre j'ai entrepris la tâche de la mesurer à partir des données de vol sur des sources connues et bien positionnées (nébuleuse du Crabe, Cyg X-1 et Nova Persei 92). J'ai mesuré et décrit par une fonction analytique sa dépendance avec l'énergie et avec le temps (sur la durée de la mission) et nous avons trouvé qu'elle était associée à l'évolution du taux de particules (Mandrou et al. 1991, Leray et al. 1991, Bouchet et al. 2001). Une fois caractérisée la SPSF, l'analyse fine par la méthode d'ajustement de la SPSF aux images delta-déconvoluées s'est révélée essentielle pour l'étude des régions denses en sources et m'a permis d'explorer en détail le champ complexe du centre galactique et d'obtenir les résultats SIGMA reportés en chapitre 4.

Mes travaux sur l'imagerie par masque à ouverture codée de SIGMA, l'étalonnage de son optique et le développement des logiciels d'analyse se sont étalés sur l'ensemble de la durée de la mission (1989-1998) et ont fait l'objet de plusieurs publications et rapports internes au projet. L'une d'entre elles (**Imaging Techniques Applied to the Coded Mask SIGMA**, par Goldwurm, 1995, **publication n° 1**), que je reproduis en fin de chapitre, faisait suite à une contribution invitée au colloque sur *Imaging in Gamma-Ray Astronomy* (1994, Capri, Italie) et publiée dans *Experimental Astronomy*.

Ma contribution au développement du système d'analyse des données SIGMA a été importante pour la réussite de la mission SIGMA. Une mission qui, au début des années 1990, a redessiné la carte du ciel aux énergies > 40 keV (Vargas et al. 1997, Revnivtsev et al. 2004) avec la découverte et le positionnement à quelques minutes d'arc près, de plus de 30 sources dont le tiers sont des trous noirs dans des systèmes binaires galactiques.

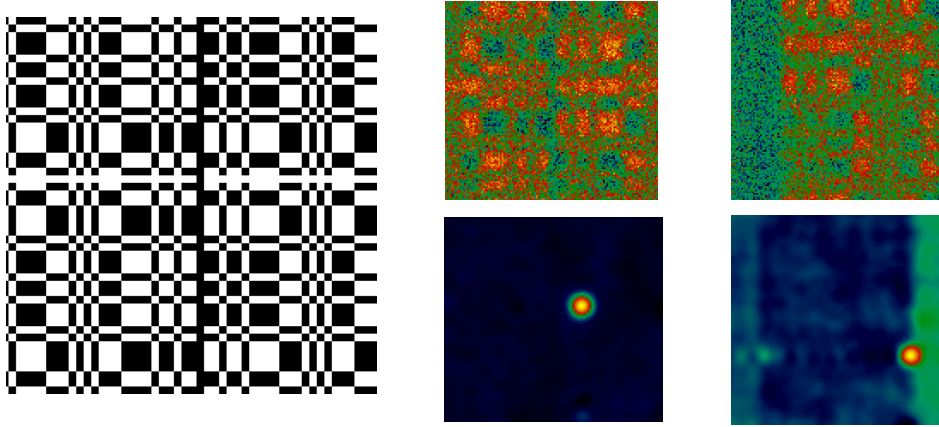


Fig. 2.1 *Gauche* : Motif URA 31×29 répliqué du masque de SIGMA. *Mieu* : Image caméra SIGMA de la nébuleuse du Crabe observée dans le champ totalement codé et son image déconvoluée du FCFOV (bas). *Droite* : Image caméra du Crabe dans le champ partiellement codé et image déconvolué du FCFOV (bas).

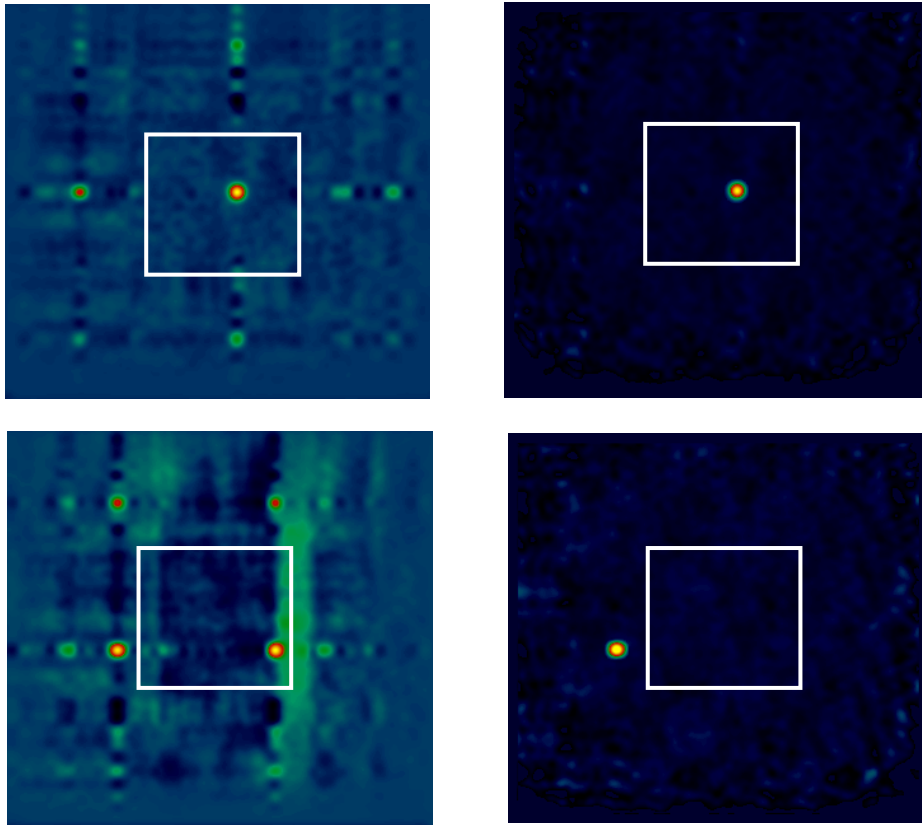


Fig. 2.2 Images déconvoluées dans le champ totale (FCFOV + PCFOV) avant (*gauche*) et après (*droite*) nettoyage des fantômes pour le Crabe observé dans le champ totalement codé (*haut*) et dans le partiellement codé (*bas*). Le carré blanc délimite le champ totalement codé.

2.4 Le système d'analyse des données INTEGRAL/IBIS

Grâce aux remarquables résultats de SIGMA, les dispositifs à ouverture codée sont aujourd'hui à la base de tous les projets d'astronomie à haute énergie. On les retrouve notamment à bord d'INTEGRAL, la grande mission européenne d'astronomie gamma lancée en octobre 2002 (Winkler et al. 2003), à laquelle le CEA a contribué en fournissant ISGRI, la gamma caméra de nouvelle génération du télescope IBIS (*Imager on Board the INTEGRAL Satellite*) (Lebrun et al. 2003, Ubertini et al 2003).

Après avoir participé à la définition du télescope IBIS en 1995-1996, notamment à celle de son système optique, j'ai dirigé depuis 1996 l'équipe en charge de la mise au point des logiciels d'analyses des données du télescope. Nous avons développé un système complet d'outils de base pour la reconstruction des images, des spectres et des courbes de lumière à partir des données IBIS/ISGRI. Ces outils sont désormais intégrés à l'ISDC, le centre des données scientifiques d'INTEGRAL installé à Versoix, Suisse (Courvoisier et al. 2003) où ils sont à la disposition de tous les astronomes ayant accès aux données de la mission. Les éléments principaux de l'analyse sont résumés dans le papier **The INTEGRAL/IBIS Scientific Data Analysis**, par **Goldwurm et al., 2003 (publication n°. 2)** et publié dans le numéro spécial de *Astronomy and Astrophysics* dédié à INTEGRAL, voir aussi Goldwurm et al. (2001).

IBIS est un télescope à ouverture codée constitué d'une masque de tungstène avec des éléments de 1,6 cm d'épaisseur posé à 3200 cm d'un détecteur formé par deux plans séparés par 10 cm. Le premier plan, la caméra ISGRI qui travaille dans la bande 15-1000 keV, est composé de 128×128 pixels de CdTe de $4 \times 4 \text{ mm}^2$, un semi-conducteur avec haut pouvoir d'arrêt et une bonne résolution spectrale. Le deuxième plan, PICSIT, opérant dans la bande 200 keV - 10 MeV, est composé de barrettes de CsI, longues 3 cm et larges d'un cm. Le télescope offre un champ de vue de $30^\circ \times 30^\circ$ avec une résolution angulaire de 13'. La sensibilité atteint 1 mCrab en 10^6 s à 100 keV.

Les principes de base de déconvolution et d'analyse valables pour SIGMA ont été repris, mais nous avons bien évidemment adapté les algorithmes aux caractéristiques du télescope IBIS. La grande différence est que le plan détecteur est composé d'éléments discrets. Avec ses 16384 pixels distincts, la caméra ISGRI est d'une grande complexité et il a fallu développer des logiciels

capables de tenir compte des propriétés de bruit intrinsèque et de géométrie propre des pixels et du plan détecteur. Les pixels sont en nombre non entier par rapport aux éléments du masque et sont séparés par des zones de non détection (zone mortes) et par des structures de support. L'instrument est très sensible et le mode dit *dithering*⁶ exige de traiter les images pendant chaque pointage (~ 30 mn) pour ensuite les combiner dans des mosaïques. Nous avons donc préparé des logiciels qui enchaînent de manière automatique la préparation et la correction des images détecteur, la reconstruction des images du ciel, la recherche des sources, l'analyse par SPSF et l'identification avec les sources d'un catalogue, le nettoyage des fantômes, la re-normalisation pour les effets hors axe et la sommation en mosaïque. La Fig. 2.3 montre de manière schématique la procédure itérative de reconstruction d'images IBIS et Fig. 2.4 la mosaïque finale obtenue pour un ensemble d'observations de la région du Cygne où se trouve Cyg X-1 le prototype de trou noir stellaire dans un système binaire.

Un travail particulier a été conduit pour la reconstruction spectrale. La reconstruction des flux des sources, pour les positions définies par l'imagerie, est réalisée par une modélisation très détaillée de la contribution des sources à l'image du plan détecteur et par l'application des méthodes d'ajustement qui permettent l'estimation du flux dans une bande d'énergie donnée. Les méthodes classiques des moindres carrés et du maximum de vraisemblance ont été appliquées mais nous avons finalement adopté une méthode qui combine une procédure itérative d'estimation de flux par source avec des ajustements simultanés de modèles. Cette dernière technique permet en effet d'utiliser seulement pour chaque source la zone détecteur dans laquelle elle projette le motif de masque. Ceci réduit la dépendance du résultat aux effets systématiques. Plus récemment nous avons optimisé l'analyse des images à l'étude de l'émission diffuse (Renaud et al. 2006).

2.5 La fonction de réponse angulaire du télescope IBIS d'INTEGRAL

Une autre étude spécifique réalisée avec Alexandra Gros a été d'obtenir la caractérisation de la réponse angulaire (SPSF) de l'instrument (**INTEGRAL IBIS/ISGRI System Point Spread Function**

⁶ Le *dithering* est le mode d'observation typique d'INTEGRAL. Consiste en un certain nombre de poses élémentaires (~30 mn) avec l'axe du télescope fixe vers une direction de pointage. Les directions de pointage des poses (séparées de ~ 2°) forment une grille autour de la cible. Le *dithering* nominal prévoit une grille carrée de 5 x 5 pointages. Le *dithering* hexagonal prévoit 7 pointages sur une grille hexagonale. Le *dithering* permet une meilleure mesure du fond pour SPI. En mode *staring* la direction de pointage est fixe.

and Source Location Accuracy, par **Gros et al. 2003, publication n° 3**) dans le but de déterminer la précision de localisation des sources ponctuelles.

Comme pour le télescope SIGMA, nous avons décrit théoriquement et expérimentalement la SPSF finale (après déconvolution) pour le système IBIS/ISGRI. Cette réponse est très proche d'une gaussienne bidimensionnelle, fonction que nous avons donc utilisée pour caractériser les paramètres. La SPSF se déforme (pour ce type de masque) dans la zone partiellement codée et la largeur à mi-hauteur n'est pas constante hors du champ totalement codé (Fig. 2 de la publication n° 3). Cet effet était en partie caché dans SIGMA à cause de la mauvaise résolution spatiale de la camera, mais avec les pixels discrets d'IBIS elle doit être considérée attentivement. Dans le travail qui a abouti à la publication, nous avons étudié en détail tous les effets et biais agissant sur la SPSF du télescope IBIS, déterminé la vraie distance masque détecteur (différente de celle reportée sur les plans de l'instrument), et étalonné l'erreur de positionnement des sources ponctuelles. La Fig. 3 de la publication n° 3, je montre l'évolution du rayon d'erreur de positionnement (au niveau de confiance de 90%) des sources ponctuelles en fonction de leur signal sur bruit, déterminé en utilisant les algorithmes de localisation sur ~ 2000 images déconvoluées des sources Cyg X-1 et Crabe. Nous avons déterminé la fonction qui décrit cette dépendance et nous l'avons comparé à la dépendance théorique. L'écart est significatif et très probablement dû aux effets systématiques (comme la non-uniformité du fond, Terrier et al. 2003). En tout cas, l'instrument, avec le logiciel que nous avons développé, permet une précision mieux d'une minute d'arc pour un signal sur bruit > 30 sur l'ensemble du champ de vue. Ce résultat est très important et donne la mesure des capacités d'imagerie du télescope IBIS.

INTEGRAL/IBIS, grâce à sa caméra ISGRI et les logiciels d'analyse que nous avons développés, a permis d'obtenir les cartes du ciel les plus précises et les plus détaillées aujourd'hui disponibles dans les bandes d'énergie entre 30 et 500 keV. En particulier, les cartes de la région du centre galactique que nous avons pu produire et étudier avec nos logiciels sont à la base d'une partie importante des résultats reportés en chapitre 4. Mais je voudrais aussi souligner que le travail de développement de logiciel d'analyse des données IBIS, réalisé avec une équipe d'ingénieurs et de physiciens du SAp entre 1998 et 2005, est à la base des logiciels d'analyse des données IBIS/ISGRI installés et distribués par l'ISDC (Walter et al. 2004) et utilisés par toute la communauté astronomique intéressée aux données INTEGRAL.

OSA Imaging Iterative Procedure

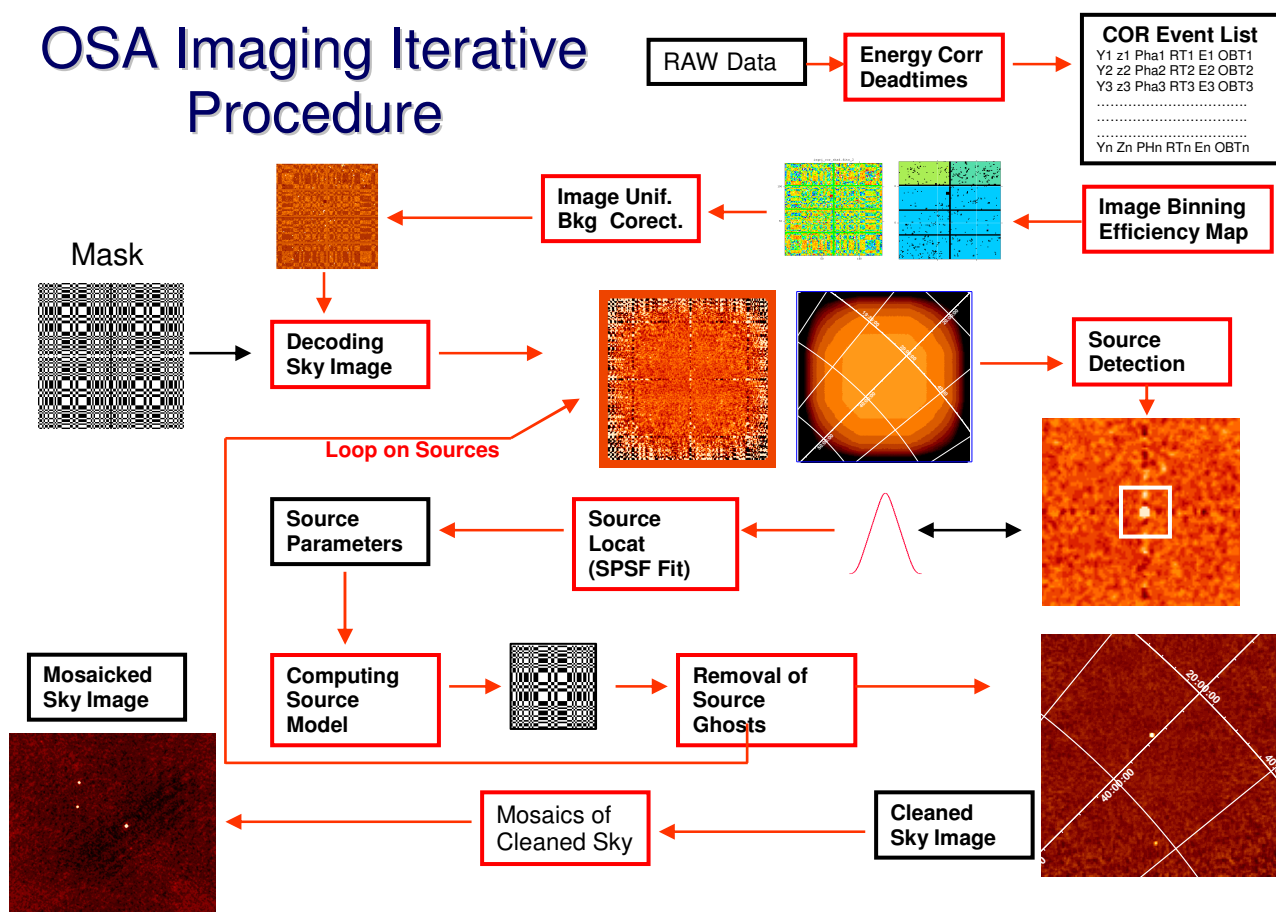


Fig. 2.3 Schéma simplifié de la procédure itérative de reconstruction d'images à partir des données IBIS/ISGRI d'INTEGRAL implémentée dans les pipelines d'analyse de l'ISDC.

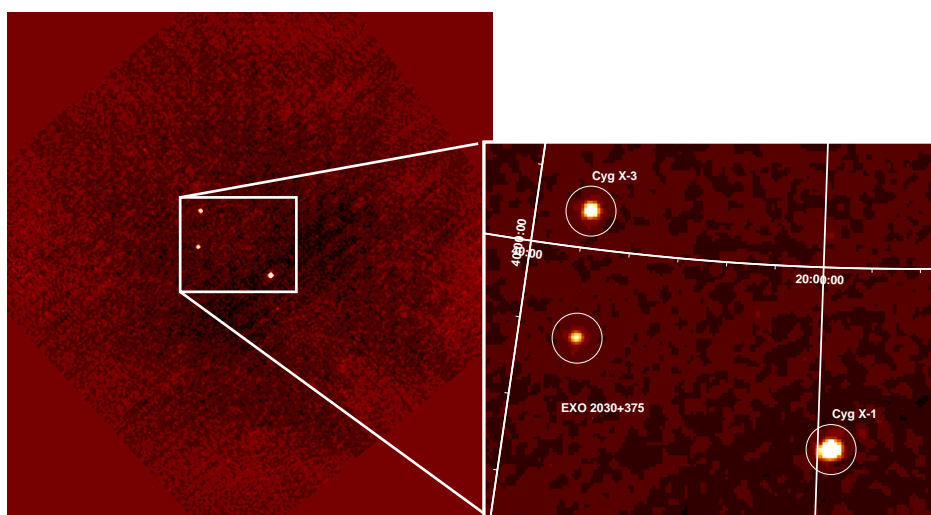


Fig. 2.4 Image mosaïque de la région de Cyg X-1 obtenue avec les procédures itératives de reconstruction d'images du ciel à partir des données IBIS/ISGRI.

Bibliographie

- Baumert, L.D., 1971, Lecture Notes in Math., Springer Verlag, Berlin, 182
Bradt, H.V.D., et al., 1992, ARAA, 30, 391
Byard, K, et al., 1990, A & A, 227, 634 [A9]
Bouchet, L., Roques, J. P., Ballet J., Goldwurm A., Paul J., 2001, *ApJ*, 548, 990 [A62]
Caroli, E., et al., 1987, Space Sci. Rev., 45, 349
Cook, W.R., et al., 1984, IEETrans.Nucl.Sci., NS-31, 771
Courvoisier, T.J.-L., et al., 2003, A&A, 411, L53
Dicke, R.H., 1968, ApJ, 153, L101
Fenimore, E.E. & Cannon, T.M. , 1978, App. Opt.,17, 337
Fenimore, E.E. & Cannon, T.M., 1981, App. Opt.,20, 1858
Goldwurm, A., et al., 1990, A & A, 227, 640 [A10]
Goldwurm, A., 1995, Exp. Astron., 6, 9 [A42] (Publication n°. 1)
Goldwurm, A., et al., 2001, ESA SP - 459, 497 [C68]
Goldwurm, A., et al., 2003, A&A, 411, L223 [A73] (Publication n°. 2)
Gros, A., et al., 2003, A & A, 411, L179 [A72] (Publication n°. 3)
Gottesman, S.R. & Fenimore, E.E. 1989, Appl. Opt. 28, 4344
Gunson, J. & Polychronopoulos, B., 1976, MNRAS, 177, 485
Lebrun, F., et al, 2003, A&A, 411, L141
Leray, J.P., et al., 1991, *Proc. of the 22nd I.C.R.C. Conf.* (Dublin), 2, 495 [C19]
Levine, W., et al. 1984, ApJS, 54, 581
Liang, E.P. & Nolan, P.L., Space Scie. Rev., 38, 353
Mandrou, P., et al., 1991, AIP Symp "Gamma-ray Line Astrophysics", AIP, 492 [C14]
Miyamoto, S., 1977, Space Scie. Instr., 3, 473
Paul, J., et al., 1991, *Advances in Space Research*, V.11, N.8, p.289 [C8]
Press, B., et al., 1992, *Numerical Recipes*, Cambridge Univ. Press, Cambridge
Proctor, R.J., et al., 1978, MNRAS, 185, 745
Proctor, R.J., et al., 1979, MNRAS, 187, 633
Renaud, M., et al., 2006, A&A, in press, astro-ph/0606113 [A100]
Revnivtsev, M., et al., 2004, AstL, 30, 527 [A81]
Skinner, G.K., et al., 1987, Nat, 330, 544
Terrier, R., et al., 2003, A&A, 411, L167 [A71]
Ubertini, P., et al., 2003, A&A, 411, L131 [A70]
Vargas, M., et al., 1997, ESA SP-382, 129 [C45]
Winkler, C. et al., 2003, A&A, 411, L1
Walter, R., et al., 2004, ASP, 314, 432 [C100]

Publications présentées

Les télescopes à masque codé (VIII – 2)

- 1 Imaging Techniques Applied to the Coded Mask SIGMA Telescope**
A. Goldwurm,
1995, *Experimental Astronomy*, V. 6, p 9

- 2 The INTEGRAL/IBIS scientific data analysis**
A. Goldwurm, P. David, L. Foschini, A. Gros, P. Laurent, A. Sauvageon, A. J. Bird, L. Lerusse and N. Produit,
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L223 (n°. citations : 94)

- 3 The INTEGRAL IBIS/ISGRI System Point Spread Function and Source Location Accuracy**
A. Gros, A. Goldwurm, M. Cadolle-Bel, P. Goldoni, J. Rodriguez, L. Foschini, M. Del Santo and P. Blay,
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L179 (n°. citations : 51)

IMAGING TECHNIQUES APPLIED TO THE CODED MASK SIGMA TELESCOPE

A. GOLDWURM

*Service d'Astrophysique /DAPNIA/CEA, Centre d'Etudes de Saclay,
91191 Gif sur Yvette Cedex - France*

Abstract. After more than four and a half years of successful operation aboard the Russian GRANAT space observatory, the French soft gamma-ray telescope SIGMA can be considered a milestone in the application of the coded mask aperture technique to high energy astronomy. The unprecedented imaging performance attained by SIGMA, coupled to the long observation time have yielded impressive results. Here I briefly describe the SIGMA imaging system and review the standard image reconstruction techniques and analysis procedures applied to the SIGMA data.

Key words: Coded masks – SIGMA

1. Introduction

Coded aperture imaging systems nowadays find their major application in high energy astronomy, and in particular in the hard X-ray (10-30 keV) and soft gamma-ray (30-2000 keV) domains where conventional focussing techniques are still very difficult to implement and where the high and variable background limits the performance of standard on/off monitoring techniques (for a review see Caroli et al. 1987). In coded aperture telescopes source radiation is spatially modulated by a mask of opaque and transparent elements before being recorded by a position sensitive detector, allowing simultaneous measurement of the background flux. Reconstruction of the sky image is generally based on a correlation procedure between the recorded image and a decoding array derived from the mask pattern. Special mask patterns, including those called uniformly redundant arrays (URA) allow the reconstructed image to be free of secondary lobes (Fenimore & Cannon 1978). The angular resolution of such a system is then defined by the angle subtended by one hole at the detector but the sensitive area depends on the number of all transparent elements. In conditions of high background (typical of the gamma-ray domain) the maximum sensitivity is obtained when this number is half the total number of elements in the basic pattern. To have a sidelobe-free response a source must be able to cast on the detector a whole basic pattern (fully coded source). To make use of all the detector area and to allow more than one source to be fully coded, avoiding ambiguities in source position, the basic pattern is normally taken of the same size and shape of the detector and the total mask made, in the case of rectangular geometry, of a mosaic of nearly 2×2 cycles of the basic pattern. Such a system is called an *optimum coded aperture system* (OCAS) (Skinner & Ponman 1994). The

TABLE I
Imaging Properties of SIGMA

FCFOV	$4.8^\circ \times 4.3^\circ$
EXFOV (0.5 sensitivity)	$11.4^\circ \times 10.6^\circ$
EXFOV (0.0 sensitivity)	$18.1^\circ \times 16.8^\circ$
Angular Resolution	$\approx 15'-21'$ (FWHM)
Localization Accuracy	$\approx 0.5'-5'$
Sensitivity (at 2σ for 20 h obs.)	≈ 26 mCrab
Angular Mask El. Size	$12.9'$
Angular Pixel Size	$1.62'$

dimensions of the mask, of the detector and their separation define the fully coded field of view (FCFOV) of the telescope. A source outside the FCFOV may project a part of the mask pattern and it is said to belong to the partially coded field of view (PCFOV). As the projected pattern is incomplete the contribution of such a source to the reconstructed FCFOV image cannot be apriori subtracted and it produces secondary lobes (coding noise). On the other hands the modulated radiation from PC sources can be reconstructed by extending with a proper normalization the correlation procedure to the PCFOV (sect. 6). The extended FOV of the telescope (EXFOV) is therefore composed by the central FCFOV of constant sensitivity surrounded by the PCFOV of decreasing sensitivity. A source outside the EXFOV simply contributes to the background level.

The launch at the end of 1989, of the SIGMA telescope aboard the GRANAT space observatory, the first soft gamma-ray (30-1300 keV) optimum coded aperture telescope on a satellite, can be considered as a milestone in the application of coded masks to high energy astronomy. At present (October 1994), after more than 4 and a half years of operation, SIGMA has collected ≈ 9200 hours of effective time of high quality data comprising about 800 observations. Its imaging performance (Table 1), never attained before in this energy domain, coupled to the long observation time have yielded impressive results (e.g. Mandrou et al. 1994, Goldwurm et al. 1994a).

2. The SIGMA Coded Aperture Imaging System

The SIGMA telescope (Paul et al. 1991, Mandrou et al. 1992) is composed of a position sensitive Anger type gamma camera (GCA), sensitive to photons between 30 and 1300 keV, and a 2.5 cm thick coded mask of square tungsten elements of 9.4 mm size placed 2.5 m from the detector plane. The GCA is a single circular 1.25 cm thick NaI(Tl) crystal of 57 cm diameter, viewed

by 61 photomultipliers (PM) in a honeycomb structure. Event positions, reconstructed using the response of all PMs, are coded in fine square pixels of 1.175 mm size and images of the central detector useful zone of 248×232 pixels ($= 794 \text{ cm}^2$), which corresponds to the mask basic pattern, are stored in the memory. Positions are estimated with a finite spatial resolution which ranges (σ) between 3 mm (200 keV) and 8 mm (30 keV). The mask is a repetition of a URA basic pattern of 31×29 elements, half of which transparent. Each square mask element corresponds to 8×8 detector pixels. To reduce the strength of the ghosts in the PCFOV the total mask is formed by 53×49 elements instead of the maximum allowed 61×57 . The mask support is opaque and a passive shielding tube is placed between the mask support and the base of the GCA which is surrounded at the bottom and on the sides by an active anticoincidence shield of CsI(Tl). This geometry (Fig. 1) and the GCA performances provide the imaging properties reported in Table 1. During the 4 day orbit of the GRANAT spacecraft, SIGMA typically performs 3 observations of ≈ 20 hours each during which images are collected at intervals of a few hours in different energy bands. GRANAT is stabilized on 3 axes, one of them constantly pointed towards the sun. However the stabilization precision is only $\approx \pm 20'$ and the satellite drifts would lead to the smearing of the projected mask pattern, if no correction was applied. Two optical star trackers follow the movement of 2 preselected stars and give estimates of the 3-axis components of the spacecraft attitude drifts every 4 seconds, which are also stored in the memory. The on-board computer then recalculates the event positions to correct for the estimated drifts along the 2 axes of the detector. At the edges of the useful zone the events which due to the correction would be moved outside the image are actually replaced on the other side of the detector array. In this way, because of the cyclic structure of the mask, the flux of a fully coded source is reconstructed correctly.

3. Uniformity Correction of Detector Images

One major problem in coded aperture systems is the non-uniform distribution of the background along the detector plane. The SIGMA telescope works in conditions of a low number of sources and a high background level, the latter being therefore the dominant component of the noise. Even a small fraction of systematic modulation of the background level produces strong noise in the deconvolved images (Laudet & Roques 1988). In the SIGMA telescope there are 2 main sources of non-uniformities. First of all the inherent defects of the GCA (non-linearity and varying efficiency) will give rise to constant structures on a short spatial scale corresponding to the distance between the GCA PMs (\approx few mask elements.) The modulation induced by the external background is instead a large scale structure of

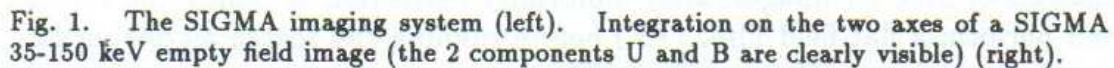
conical shape peaked about the center of the detector (Fig. 1) and variable on timescales from hours/days (activation during Van Allen belt passage, solar flares) to weeks/months (orbit parameters, solar cycle CR modulation) (Cordier 1991). The constant orbit circularization and the approaching of solar minimum make this component vary mainly on the longer time scales. We have measured these components by performing observations of source empty fields during the entire SIGMA mission (\approx each 3 months). During these observations the star sensors were off so that no attitude correction was applied to the recorded images. If U is the GCA non-uniformity and B the background structure, then the recorded detector image during an observation is

$$D = (S * M)U^d + (BU)^d$$

where the superscript “d” means convolution with the histogram of the on-board drift corrections H_c (e.g. $U^d = U * H_c$). Indeed the term B is independent of small direction changes and is modulated by U before the on-board drift correction is applied. The source term S on the other hand is modulated by the mask M and then replaced by the drift correction algorithm after being modulated by the corresponding U^d . The empty field image D_{EF} is instead given by $D_{EF} = B_{EF}U$ and a correction of the systematic noise can be obtained with

$$\frac{D - D_{EF}^d}{U'^d} = (S * M) \frac{U^d}{U'^d} + \frac{((B - B_{EF})U)^d}{U'^d}$$

if from D_{EF} it is possible to estimate the contribution (U') of U . If U' is a good estimate of U and B_{EF} is close to B we obtain the needed correction. The empty-field images are grouped together to reduce their statistical noise and separation of the U component is performed by high-pass filtering (B contributes mainly at low frequencies). The main problem with this procedure is the variability of B . Also U is not completely constant and the array U' derived from the empty fields is not always a good estimate of the GCA non-uniformity. Because these residual effects are dominated by the background term a simple division by D_{EF}^d often gives very similar corrections. Residual systematic noise is then reduced by different techniques. One standard way is to perform a local background subtraction after deconvolution, where the local background is measured in a circular corona far enough to avoid source pixels (flat-field filter). Other methods employ subtraction of a fitted parabolic function or filtering before deconvolution (Schmitz-Fraysse et al. 1994). In general these techniques, not based on a model of the background distribution, prevent the study of extended diffuse emission, but they are quite effective to allow the search and analysis of discrete sources. Finally an estimate of the goodness of the correction is given by the ratio of the measured variance of the deconvolved image and its expected value for pure



4. Standard Deconvolutions in the FCFOV

For an OCAS with a URA mask a simple cross-correlation of the recorded image and a deconvolution array G derived from the mask by substituting 1 for transparent and -1 for opaque elements ($G = 2M - 1$) provides a sidelobe-free image of the source flux distribution in the FCFOV, apart from a flat background level (Caroli et al. 1987). Other values than $+1$ and -1 can be used leading to different normalizations (Skinner & Ponman 1994), but in any case the background level must be estimated to evaluate the source fluxes. To increase the telescope sensitivity, detector pixels are usually of smaller size than the mask elements, and the correlation can take the form of *fine cross-correlation* (FC), where the array G is itself divided in finer elements and then correlated. In the *delta-decoding* (DD) (Fenimore & Cannon 1981) form, instead, the fine decoding array contains only one pixel per mask element with a value ($+1$ or -1) different from 0. DD is a more general form because a simple convolution of a DD image with a block function of one mask element dimension provides a FC decoded image. Delta-decoded images also conserve the important statistical property that image pixels are statistically quasi-independent (they are actually independent only within

a mask element). It can be shown indeed that the correlation coefficient between two reconstructed sky mask-elements is given by $-\frac{1}{n}$ where n is the total number of basic pattern elements (e.g. Skinner & Ponman 1994). This is of course a very important property because the standard least squares method can be applied to a DD image, and indeed fine analysis of source parameters is best performed using this technique (sect. 5). Fine correlation on the other hand provides a representation of the source distribution which is convenient for the search of significant excesses. When the detector spatial resolution is finite and is not negligible with respect to the mask element size, an even more sensitive reconstruction is what we call *PSF deconvolution* (PSFD). A DD image is, in this case, convolved with the DD point spread function (PSF) (sect. 5) rather than with a block function. It can be shown that, in this way the statistical high frequency noise is suppressed and the signal to noise ratio (S/N) of point-like sources optimized. Clearly in FC and PSFD images pixels are highly correlated. In the standard analysis of SIGMA images, after uniformity correction we apply the PSFD and perform a flat-field filter (FF) before running the search algorithm for significant excesses. However in PSFD images, sources are spread out and enlarged because of the PSF convolution, and it is not the best procedure to use when we look for close sources. Moreover the FF filter also modifies the final image creating a corona of negative values around each source (Fig. 2). The final data analysis procedure is an iterative process for which first a PSFD plus a FF filter is performed and then the image is analyzed to search for signals at known source positions or significant excesses (see Caroli et al. 1987 for a discussion on significant detection in OCAS). The stronger detected source is then subtracted and the procedure re-starts. The reconstructed source count rates (in FC units) are then converted into photon fluxes with the telescope energy response matrix (Barret & Laurent 1991) and used to perform standard timing/spectral analysis.

5. Delta-Decoding Point Spread Function and Fine Analysis

We use delta-decoded images to evaluate source parameters and their errors by comparing DD image sectors with the telescope point spread function (PSF) by means of the chi-square fitting technique. For PSF we mean the final response of the imaging system to a point-like source after deconvolution. In the FCFOV of an optimum coded aperture system the PSF is given by the convolution between a function describing the blurring of the detector finite spatial resolution (typically a bidimensional Gaussian function) and a function describing the discrete deconvolution process. In the case of DD the latter is a one-mask-element wide block function convolved with a one-pixel wide block function. In the case of fine cross-correlation this function is instead a square-pyramidal function of width (FWHM) equal to one mask

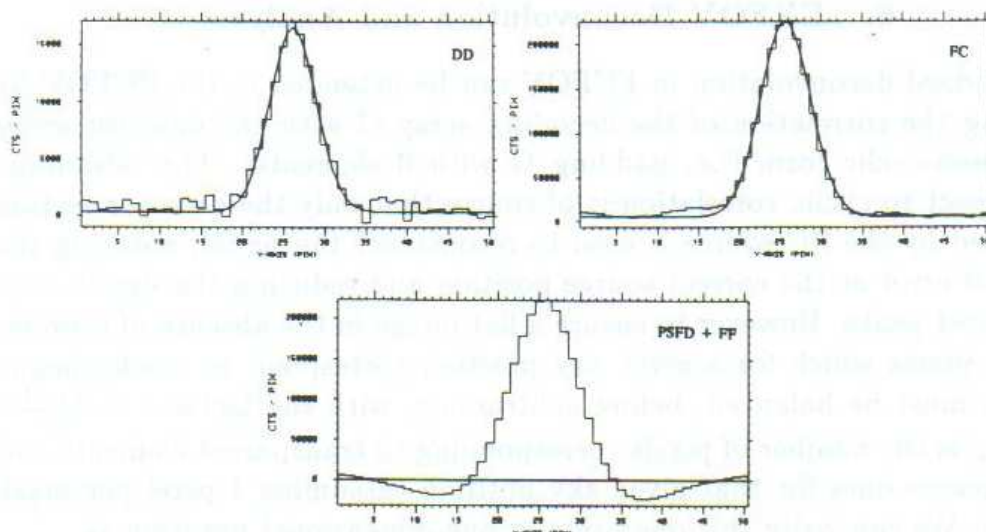


Fig. 2. Delta-decoding, fine correlation, and PSF deconvolution plus FF filter, for a 35-75 keV image of Cyg X-1. Solid lines in DD and FC histograms show the relative PSFs.

element (Fenimore & Cannon, 1981). The PSF for DD can be conveniently described by an analytical function (Fig. 2) which depends, in addition to the source flux and position and background level, on the detector spatial resolution. This is a key parameter of the PSF because it influences its width and the total imaging sensitivity of the telescope. Derivatives of the PSF can be computed and the covariance matrix of the chi-square fit (Press et al. 1986) between the PSF and a DD image sector calculated. The procedure and in particular the error estimation have been checked by numerical simulations and it was found acceptable down to S/N ratios of $\approx 4-5$. This technique has been applied to the data collected during the mission from strong and well identified sources (Crab, Cyg X-1, X-Ray Nova Persei 92) to perform in-flight calibrations of the SIGMA imaging system and in particular to measure the spatial resolution and the systematic position offset, their dependence with energy and their variability. Once these key parameters are obtained and the model of the telescope PSF fixed, the technique can be applied to obtain the error boxes of the detected sources and to study images with close sources (for which correlation techniques cannot be applied). A clear example of the power (and the limits) of the SIGMA imaging system is the detection of A 1742-294. In September 1992 the shape of the Galactic Center source 1E 1740.7-2942 appeared clearly elongated. By fitting the PSF for 2 close sources we could derive their positions and errors and identify the second 5.3σ excess with the X-ray burster A 1742-294 (Goldwurm et al. 1994b), some $30'$ away from the main source. Another relevant application was in the analysis of the Galactic Center images performed to set upper limits to the > 30 keV emission from Sgr A* (Goldwurm et al. 1994a).

6. EXFOV Deconvolution and Analysis

The standard deconvolution in FCFOV can be extended in the PCFOV by extending the correlation of the decoding array G with the detector array D in a non-cyclic form (i.e. padding G with 0 elements). The advantage with respect to cyclic correlation is of course that only the detector section modulated by the PC source is used to reconstruct the signal, reducing the statistical error at the correct source position and reducing the significance of the ghost peaks. However to ensure a flat image in the absence of sources, detector pixels which for a given sky position correspond to mask opaque elements must be balanced, before subtraction, with the factor $b = \frac{n_+ - 1}{n_-}$, where n_+ is the number of pixels corresponding to transparent elements and n_- to opaque ones for that given sky position (assuming 1 pixel per mask element). We can write this operation in one-dimensional notation as

$$S_i = \sum_k M_{i+k}^+ D_k - b_i \sum_k M_{i+k}^- D_k$$

where the decoding arrays are obtained from the mask M by $M^+ = M$ and $M^- = 1 - M$ and then padded with 0's, and where the sum is performed over all detector elements. In the FCFOV we obtain the same result of the standard FCFOV correlation. However we have to consider the onboard drift corrections. These corrections replace part of the modulated counts of a PC source on the other side of the detector image and, using the previous formula, they are not summed at the source position but rather at the FCFOV ghost peak. To consider this effect a weighting array W is built by the convolution of the drifts histogram and a unity array of the dimension of the detector image. W has dimensions greater than the detector array, which is then enlarged to these dimensions by cyclic repetition of its elements and multiplied by the W array before being decoded. We have

$$S_i = \sum_k M_{i+k}^+ W_k D_k^E - b_i \sum_k M_{i+k}^- W_k D_k^E$$

where now $b_i = \frac{\sum_k M_{i+k}^+ W_k - 1}{\sum_k M_{i+k}^- W_k}$ and where the sums are extended to the whole enlarged detector array D^E . For the variance however the weights W_k which refer to the same pixel in D must be summed before squaring and the formula for the variance image (which is not constant outside the FCFOV) is

$$V_i = \sum_k^{d_D} D_k^E \left(\sum_{h=0}^1 M_{i+k+hd_D}^+ W_{k+hd_D} \right)^2 + b_i^2 \sum_k^{d_D} D_k^E \left(\sum_{h=0}^1 M_{i+k+hd_D}^- W_{k+hd_D} \right)^2$$

where now the first sums are over the dimension d_D of the original detector array D , and the array W is padded with 0's. The varying effective area

can be calculated by similar formula (the first sum of the 2nd term of this equation without the value D_k^E) and a normalization is included to obtain an intensity image in equivalent counts for a FC deconvolution in FCFOV (our standard units). All this can be performed in DD, FC or PSFD form, where for PSF-deconvolution in EXFOV we mean a DD deconvolution followed by a convolution with the PSF for DD in FCFOV. Naturally in this case also the variance image must be convolved and all corresponding normalizations performed. This procedure can be performed with a fast algorithm which is an extension of the algorithm proposed by Roques (1987) for the FCFOV and which exploits the symmetry of URA masks. Alternatively it is possible to reduce some of the previous formula to a set of correlations which can be computed by means of the FFT. In the EXFOV standard analysis, images are deconvolved in PSFD form, FF filtered, divided by the image of the standard deviations ($\sigma = \sqrt{V}$) (increased by a factor which accounts for residual systematic noise (sect. 3)) and values $> 5-6$ (significant excesses) are then searched for throughout the image along with significant signals ($> 3\sigma$) at known X-ray source positions.

7. Model of the PCFOV Response and Sum of Images

SIGMA was not conceived to observe in the PCFOV and a model of the PCFOV imaging response is needed to improve the analysis and perform image cleaning. Because of the partial modulation the true PSF in the PCFOV is not the same as in the FCFOV, it varies with the position and it contains sidelobes. The reasoning adopted to show that in DD images, pixels are statistically independent is not valid anymore. However pixels in PCFOV DD images are still weakly correlated locally and the PSF in the central peak is not too different from the FCFOV PSF. Therefore PSFD using the FCFOV PSF is still very useful to increase the S/N ratio for point-like PC sources and the least squares technique (with the FCFOV PSF) can be applied to PCFOV DD image sectors to determine source position. The bias introduced by using the incorrect PSF can be evaluated by modelling the response for a given sky position and running the algorithm on the modelled image. Such a response model is necessary also to obtain the correct fluxes. It must take into account the mask element thickness, the effects at the mask border, the different opacity of the mask support and of the passive shield, and the transparent zones in or between these elements. This model is also used to perform the image cleaning from coding noise. Each source in the EXFOV creates in the decoded image a noise composed of diffuse modulation and 8 main source-like ghosts, located at distances multiple of the basic pattern from the source peak. Because the mask is 9 elements smaller in each direction than a 2×2 pattern, ghosts will be less significant than the source peak and in general no ambiguity arises. However, when a source

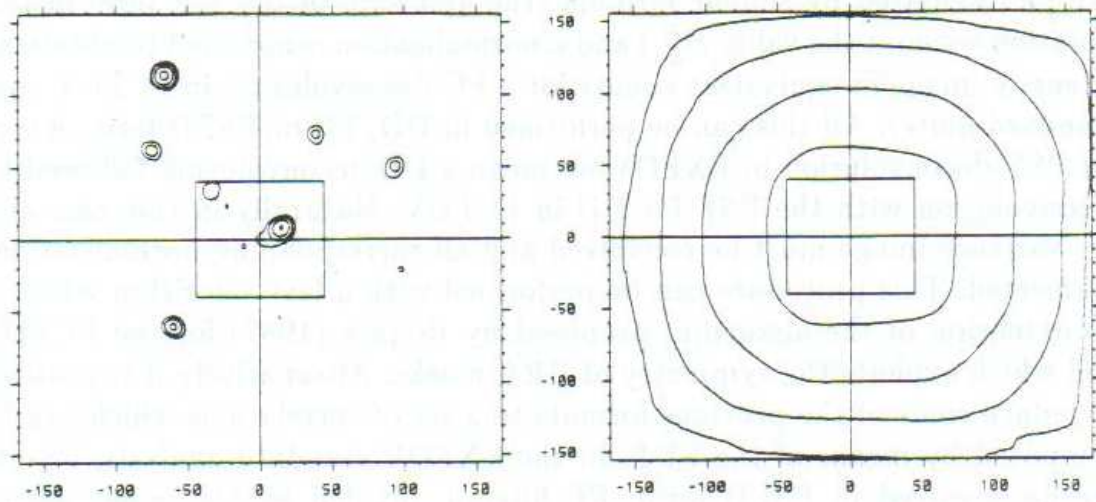


Fig. 3. Sum of 109 SIGMA EXFOV images of the Galactic Center in the 35-75 keV band plotted in the EXFOV frame of the 1st observation (the central FCFOV is also shown). Contours are in units of standard deviations (from 4.5σ to 40σ) (left). Image of the sensitivity ($\frac{1}{\sigma}$) for the same field (contours from 30 % to 90 % of maximum) (right).

is detected, the cleaning of the coding noise is essential before searching for other excesses or adding several decoded images. An iterative procedure which performs uniform correction, deconvolves the intensity and variance EXFOV images, cleans the coding noise of detected sources, applies a FF filter and then performs a weighted sum at each pixel (using the variance array and exposure time) for a set of images of superposed sky regions has been developed and tested. It was used to add 109 images of the Galactic Bulge region, for a total of ≈ 1800 hours of effective exposure time, and to build the most precise images (1σ errors $< 2\text{-}3$ mCrab) of this sky region (Fig. 3) ever obtained in this energy domain (Goldwurm et al. 1994a).

References

- Barret, D., & Laurent, P.: 1991, *N.I.M.P.R.* **A307**, 512
 Caroli, E., et al.: 1987, *Space Sci. Rev.* **45**, 349
 Cordier, B.: 1991, *Thèse doctorale*, Université de Paris VII
 Fenimore, E.E., & Cannon, T.M.: 1978, *Appl. Opt.* **17**(3), 337
 Fenimore, E.E., & Cannon, T.M.: 1981, *Appl. Opt.* **20**(10), 1858
 Goldwurm, A., et al.: 1994a, *Nature* **371**, 589
 Goldwurm, A., et al.: 1994b, *AIP Conf. Proc.* **304**, 421
 Laudet, P., & Roques, J.P.: 1988, *N.I.M.P.R.* **A267**, 212
 Mandrou, P., et al.: 1992, *AIP Conf. Proc.* **232**, 492
 Mandrou, P., et al.: 1994, *Ap. J. Suppl.* **92**, 343
 Paul, J., et al.: 1991, *Adv. Space Res.* **11**(8), 289
 Press, W.H., et al.: 1986, *Numerical Recipes*, Cambridge University Press
 Roques, J.P.: 1987, *Appl. Opt.* **26**(18), 3862
 Schmitz-Fraysse, M.C., et al.: 1994, *these proceedings*, Kluwer Academic Publishers
 Skinner, G.K., & Ponman, T.J.: 1994, *M.N.R.A.S.* **267**, 518

The INTEGRAL/IBIS scientific data analysis[★]

A. Goldwurm¹, P. David¹, L. Foschini², A. Gros¹, P. Laurent¹, A. Sauvageon¹,
 A. J. Bird³, L. Lerusse⁴, and N. Produit⁴

¹ CEA Saclay, DSM/DAPNIA/SAP, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

² IASF/CNR, sezione di Bologna, via Gobetti 101, 40129 Bologna, Italy

³ School of Physics and Astronomy, University of Southampton, Highfield, SO17 1BJ, UK

⁴ Integral Science Data Center, Chemin d'Écogia, 16, 1290 Versoix, Switzerland

Received 16 July 2003 / Accepted 10 September 2003

Abstract. The gamma-ray astronomical observatory INTEGRAL, successfully launched on 17th October 2002, carries two large gamma-ray telescopes. One of them is the coded-mask imaging gamma-ray telescope onboard the INTEGRAL satellite (IBIS) which provides high-resolution ($\approx 12'$) sky images of $29^\circ \times 29^\circ$ in the energy range from 15 keV to 10 MeV with typical on-axis sensitivity of ≈ 1 mCrab at 100 keV (3σ , 10^6 s exposure). We report here the general description of the IBIS coded-mask imaging system and of the standard IBIS science data analysis procedures. These procedures reconstruct, clean and combine IBIS sky images providing at the same time detection, identification and preliminary analysis of point-like sources present in the field. Spectral extraction has also been implemented and is based on simultaneous fitting of source and background shadowgram models to detector images. The procedures are illustrated using some of the IBIS data collected during the inflight calibrations and present performance is discussed. The analysis programs described here have been integrated as instrument specific software in the Integral Science Data Center (ISDC) analysis software packages currently used for the Quick Look, Standard and Off-line Scientific Analysis.

Key words. coded masks – imaging – gamma-rays

1. The IBIS coded aperture imaging system

The IBIS telescope (Imager on Board of the INTEGRAL Satellite) (Ubertini et al. 2003), launched onboard the ESA gamma-ray space mission INTEGRAL (Winkler et al. 2003) on October 2002, is a hard-X ray/soft γ -ray telescope based on a coded aperture imaging system (Goldwurm et al. 2001).

In coded aperture telescopes (Fig. 1) (Caroli et al. 1987; Goldwurm 1995; Skinner 1995) the source radiation is spatially modulated by a mask of opaque and transparent elements before being recorded by a position sensitive detector, allowing simultaneous measurement of source plus background (detector area corresponding to the mask holes) and background fluxes (detector corresponding to the opaque elements). Mask patterns are designed to allow each source in the field of view (FOV) to cast a unique shadowgram on the detector, in order to avoid ambiguities in the reconstruction of the sky image. This reconstruction (deconvolution) is generally based on a correlation procedure between the recorded image and a decoding

array derived from the mask pattern. Assuming a perfect position sensitive detector plane (infinite spatial resolution), the angular resolution of such a system is then defined by the angle subtended by one hole at the detector. The sensitive area instead depends on the number of all transparent elements of the mask viewed by the detector. In the gamma-ray domain where the count rate is dominated by the background, the optimum transparent fraction is one half. The field of view (sky region where source radiation is modulated by the mask) is determined by the mask and the detector dimensions and their respective distance. To optimize the sensitive area of the detector and have large FOVs, masks larger than the detector plane are usually employed. The FOV is thus divided in two parts. The fully coded (FC) FOV for which all source radiation directed towards the detector plane is modulated by the mask and the Partially Coded (PC) FOV for which only a fraction of it is modulated by the mask. The rest, if detected, cannot be easily distinguished from the background. If holes are uniformly distributed the sensitivity is approximately constant in the FCFOV and decreases in the PCFOV.

Representing the mask with an array M of 1 (transparent) and 0 (opaque) elements, the detector array D is given by the convolution of the sky image S with M plus an unmodulated background array term B : $D = S \star M + B$. If M has a correlation inverse array G such that $M \star G = \delta$ -function,

Send offprint requests to: A. Goldwurm, e-mail: agoldwurm@cea.fr

[★] Based on observations with INTEGRAL, an ESA project with instruments and science data centre funded by ESA member states (especially the PI countries: Denmark, France, Germany, Italy, Switzerland, Spain), Czech Republic and Poland, and with the participation of Russia and the USA.

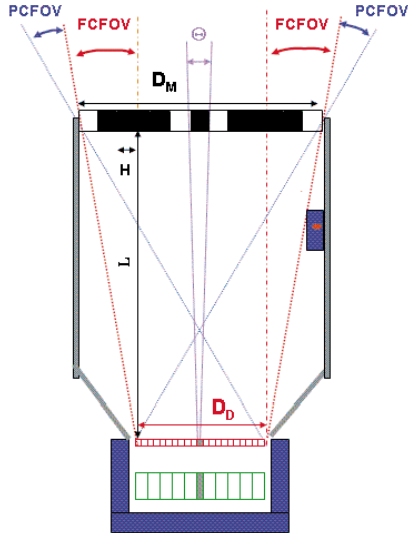


Fig. 1. Scheme (not in scale) of the IBIS imaging system: a coded mask of $11.2 \times 11.2 \times 16$ mm³ tungsten elements, an upper low-energy detector plane (red) of 128×128 CdTe crystals ($4 \times 4 \times 2$ mm³, pitch pixel-to-pixel = 4.6 mm), a high energy bottom detector plane (green) of 64×64 CsI bars ($8.4 \times 8.4 \times 30$ mm³, pitch pixel-to-pixel = 9.2 mm), an active BGO veto system (blue) composed of 19 crystals viewed by photomultipliers, a passive shield made by a tube and a Hopper shield (grey), a calibration unit attached to the tube. The Fully Coded ($= \arctan[(D_M - D_D)/L]$), and the Partially Coded, ($= \arctan[(D_M + D_D)/L]$), Field of Views are indicated along with the telescope angular resolution ($FWHM$) $\Theta = \arctan(H/L)$, where D_D and D_M are the detector and mask dimensions, H is the width of the mask elements and L the distance mask-detector (≈ 3200 mm for ISGRI).

then we can reconstruct the sky by performing the following simple operation

$$S' = D \star G = S \star M \star G + B \star G = S \star \delta + B \star G \\ = S + B \star G$$

and S' differs from S only by the $B \star G$ term. In the case the total mask M is derived from a cyclic replication of the same basic pattern and the background is given by a flat array B , the term $B \star G$ is a constant and can be removed. Mask patterns with such properties, including the *uniformly redundant arrays* (URA), were found in the 70s (Fenimore & Cannon 1978) and then successfully employed in X/ γ -ray telescopes on-board several high energy missions (Caroli et al. 1987; Paul et al. 1991).

The IBIS coded mask imaging system (Fig. 1) includes a replicated Modified URA (MURA) (Gottesman & Fenimore 1989) mask of tungsten elements (Fig. 2) and 2 pixellated gamma-ray detector planes, both approximately of the same size of the mask basic pattern: ISGRI, the low energy band (15 keV–1 MeV) camera (Lebrun et al. 2003) and PICsIT, sensitive to photons between 175 keV and 10 MeV, disposed about 10 cm below ISGRI (Di Cocco et al. 2003). The physical characteristics of the IBIS telescope define a FCFOV of $8^\circ \times 8^\circ$ and a total FOV (FCFOV+PCFOV) of $19^\circ \times 19^\circ$ at half sensitivity and of $29^\circ \times 29^\circ$ at zero sensitivity. The nominal angular

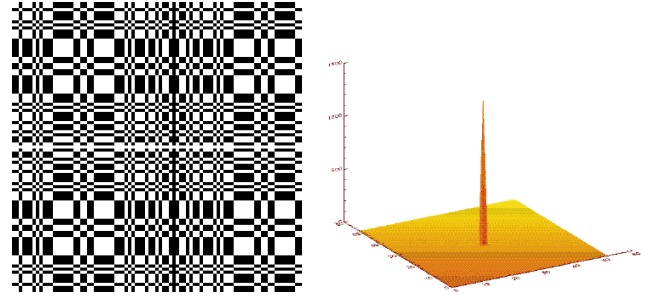


Fig. 2. The IBIS mask pattern of 95×95 elements (left) is formed by a replicated 53×53 MURA basic pattern, whose cyclic autocorrelation (right) is a δ function.

resolution ($FWHM$) is of $12'$. ISGRI images are sampled in $5'$ pixels while PICsIT images in $10'$ pixels. The MURAs are nearly-optimum masks and a *correlation inverse* is obtained by setting $G = 2M - 1$ (i.e. $G = +1$ for $M = 1$, $G = -1$ for $M = 0$) apart from the central element which is set to 0. Simple correlation between such array and the detector plane array provides a sky image of the FCFOV where point sources appear as spikes of approximately the size ($FWHM$) of 1 projected mask element ($12'$) with flat sidelobes (Fig. 2). The detailed shape of the System Point Spread Function (SPSF), the final response of the imaging system including the decoding process to the a point source, actually depends also on the instrument features (pixel size, detector deadzones, mask thickness, etc.) and on the decoding process (Gros et al. 2003). For this simple reconstruction (sum of transparent elements and subtraction of opaque ones) and assuming Poissonian noise, the variance in each reconstructed sky pixel of the FCFOV is constant and simply given by $V = G^2 \star D = \sum_{kl} D_{kl}$, i.e. the total counts recorded by the detector. Therefore the source signal to noise is simply

$$S/N = \frac{C_S}{\sqrt{C_S + C_B}} = \frac{\text{Reconstructed Source Counts}}{\sqrt{\text{Total Counts}}}$$

Sources outside the FCFOV but within the PCFOV still project part of the mask on the detector and their contribution can (and must) be reconstructed by properly extending the analysis in this region of the sky. In the PCFOV the SPSF does have secondary lobes (Fig. 3), the sensitivity decreases and the relative variance increases towards the edge of the field. In this part of the field also FCFOV sources will produce side lobes (see Sect. 2).

2. Sky image deconvolution

The discrete deconvolution in FCFOV can be extended to the total (FC+PC) FOV by performing the correlation of the detector array D in a non cyclic form with the G array extended and padded with 0 elements outside the mask. Since the number of correlated (transparent and opaque) elements in the PCFOV is not constant as in the FCFOV, the sums and subtractions for

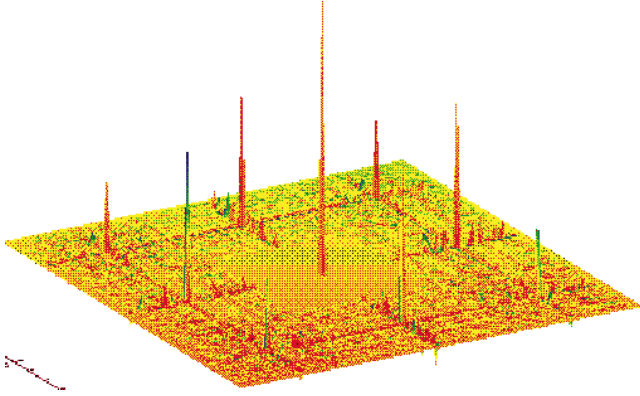


Fig. 3. The System Point Spread Function over the complete FOV for the IBIS/ISGRI telescope.

each sky position must be balanced and renormalized. This can be written by

$$S_{ij} = \frac{\sum_{kl} G_{i+k,j+l}^+ W_{kl} D_{kl}}{\sum_{kl} G_{i+k,j+l}^+ W_{kl}} - \frac{\sum_{kl} G_{i+k,j+l}^- W_{kl} D_{kl}}{\sum_{kl} G_{i+k,j+l}^- W_{kl}}$$

where the decoding arrays are obtained from the G array by setting $G^+ = G$ for $G > 0$, $G^+ = 0$ for $G \leq 0$ and $G^- = -G$ for $G < 0$, $G^- = 0$ for $G \geq 0$, and then are enlarged and padded with 0's outside the mask region. The sum is performed over all detector elements k, l and i, j run over all sky pixels (both of FC and PCFOV). In the FCFOV we obtain the same result of the standard FCFOV correlation. To consider effects such as satellite drift corrections (see Goldwurm 1995), dead areas, noisy pixels or other instrumental effects which require different weighing of pixels values, a specific array W is used. For example W is set to 0 for noisy pixels or detector dead areas and corresponding detector pixels are not included in the computation. The variance, which is not constant outside the FCFOV, is computed accordingly by

$$V_{ij} = \frac{\sum_{kl} (G_{i+k,j+l}^+ W_{kl})^2 D_{kl}}{(\sum_{kl} G_{i+k,j+l}^+ W_{kl})^2} + \frac{\sum_{kl} (G_{i+k,j+l}^- W_{kl})^2 D_{kl}}{(\sum_{kl} G_{i+k,j+l}^- W_{kl})^2}$$

since the cross-terms G^+ and G^- vanish. In the FCFOV the variance is approximately constant and equal to the total number of counts on the detector. The values computed by these formula are then renormalized to obtain the images of reconstructed counts per second from the whole detector for an on-axis source. Since mask elements are larger than detector pixels, the decoding arrays are derived as above after G has been sampled in detector pixels by projection and redistribution of its values on a pixel grid. For non integer sampling of elements in pixels (the IBIS case) G will assume continuous values from -1 to 1 . Different options can be adopted for the fine sampling of the decoding array (Fenimore & Cannon 1981; Goldwurm 1995), the one we follow optimizes the point source signal to noise (while slightly spreading the SPSF peak). The SPSF, for an on-axis source and the IBIS/ISGRI configuration, obtained with the described deconvolution is shown in Fig. 3. Note the central peak and the flat level in the FCFOV, and the

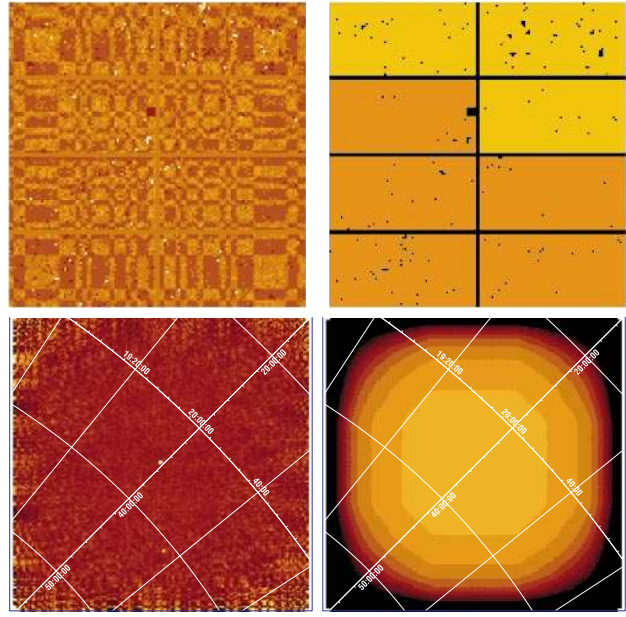


Fig. 4. Results of reconstruction procedure applied to IBIS/ISGRI data of the Cygnus region: detector image after background correction (*up, left*), associated efficiency image (*up, right*), decoded and cleaned sky image in the whole FOV (FC+PC) (*down, left*), associated variance (*down, right*). The algorithm detected, and identified 2 sources: Cyg X-1 at the center of the FOV and Cyg X-3 in the PCFOV.

secondary lobes with the 8 main ghosts of the source peak at distances multiple of the mask basic pattern in the PCFOV. This procedure can be carried out with a fast algorithm by reducing previous formulae to a set of correlations computed by means of FFTs.

3. Non-uniformity and background correction

In most cases and in particular at high energies the background is not spatially uniform. Further modulation is introduced on the background and source terms by the intrinsic detector non-uniformity. The modulation is magnified by the decoding process (the term $G \star B$ in Sect. 1) and strong systematic noise is generated in the deconvolved images (Laudet & Roques 1988). The resulting systematic image structures have spatial frequencies similar to those of the modulation on the detector plane. For the IBIS detector, intrinsic non-uniformity is generated by variations in efficiency of single detectors or associated electronics. Anticoincidence effects and scattering may also induce features at small spatial scales, of the order of the mask element size (Bird et al. 2003). The modulation induced by the external background is normally a large scale structure dominated by the differences in efficiency of the veto system and of multiple event tagging. The background intensity may be variable on timescales from hours/days (activation in radiation belts, solar flares) to weeks/months (orbit circularization, solar cycle modulation) (Terrier et al. 2003).

For the PICsIT layer, two more effects should be taken into account: the modulation at the border of the detector semimodules (Di Cocco et al. 2003) caused by the onboard multiple

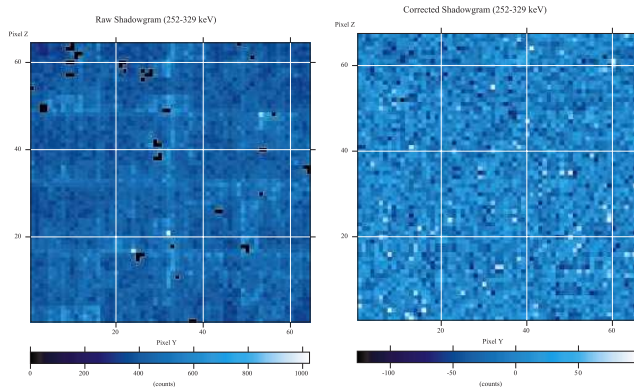


Fig. 5. Results of the background correction on a PICsIT single event shadowgram (252–329 keV) of the Crab region. The raw image (*left*) shows presence of dead pixels and count excess on the module borders, not visible in the background corrected image (*right*).

reconstruction system, and the cosmic-rays induced events. The former is due to the fact that multiple events are reconstructed by analysing events per semimodule. When a multiple event is detected by two semimodules, it is considered as two single events. Since this occurs at the borders of the semimodules, there is an excess of single events in these zones, and a corresponding deficit of multiple counts in the same pixels. Obviously this effect becomes important as the energy increases. In Fig. 5 it is shown an example of a single event shadowgram not yet corrected, where the border effects are clearly visible, and after the correction for background and non-uniformities (Natalucci et al. 2003). The second effect is due to spurious events caused by cosmic-rays interaction with CsI crystals (Segreto et al. 2003). This is relevant only at low energies (<250 keV) and results in a loss of sensitivity of about a factor of 4. It is possible to remove these fake events only if PICsIT is in photon-by-photon mode, while on the histograms it is possible to apply only an a posteriori *correction*, by rescaling those pixels that, after the background subtraction, appear to be still noisy.

If the shape of the background does not vary rapidly, regular observations of source empty fields can provide measures of the background spatial distribution which can be used to flat-field the detector images prior to the decoding (contribution of weak sources is smoothed out by summing images corresponding to different pointing aspects) (Bouchet et al. 2001). If U is the detector non-uniformity and B the background structure, then the recorded detector image during an observation is $D = (S * M)U + B$ and a basic correction can be performed by $(D - bB_{\text{EF}})/U_C$, where B_{EF} is obtained from the empty field observations, U_C is an estimate of the detector non-uniformity from ground calibrations or Monte Carlo modelling and b is a normalization factor. If U_C is a good estimate of U and B_{EF} is close to B we obtain the needed correction. The normalization b is estimated either using the relative exposure times or the total number of counts in the images.

4. The IBIS scientific data analysis

The specific procedure for the IBIS data analysis starts from the data files obtained with the Integral Science Data Center (ISDC) (Courvoisier et al. 2003) preprocessing and performs a number of analysis steps which are hereafter described for the IBIS *standard and photon-photon modes* and the ISGRI and PICsIT data only.

The ISDC preprocessing decodes the telemetry packets, prepares the scientific and housekeeping (HK) data with the proper satellite onboard times. This analysis task also computes the good time intervals by checking the satellite attitude, the telemetry gaps and the instrument modes and by monitoring the technological parameters. For the IBIS standard mode (Ubertini et al. 2003; Di Cocco et al. 2003) the following data sets are provided, for each elementary observation interval (science window) which corresponds to a constant pointing or slew satellite mode:

- ISGRI event list: position, arrival time, pulse-height channel, rise-time.
- PICsIT spectral-image histograms: 2 sets of 64×64 pixel images in 256 energy channels, one for the integrated single events and the other for the integrated multiple events.
- PICsIT spectral timing histograms: count rates from the whole PICsIT camera integrated in a short time interval (0.97–500 ms, default: 2 ms) for up to 8 energy bands (default: 4 bands).
- Compton events list: ISGRI position, PICsIT position, ISGRI deposited energy, PICsIT deposited energy, ISGRI risetime, arrival time of events in coincidence between ISGRI and PICsIT. For the IBIS photon-photon mode the same ISGRI and Compton data are provided while PICsIT histograms are replaced by
- PICsIT event list for single and double events: position, deposited energy, arrival time.

The first tasks performed by the IBIS specific software are the computation of the livetimes of the single pixels, of the dead-times and of the deposited energies for all events. Detector images are then built and corrected. Sky images are reconstructed for each pointing and then combined to obtain mosaic of sky images of the whole observation. Source spectra are extracted by performing image binning and correction on small energy bands and then comparing resulting images to source models. All data products are written in files with the standard FITS and OGIP format in order to allow the use of standard high-level data analysis packages like FTOOLS, XSPEC and DS9.

4.1. Pixels livetimes, deadtimes and energy corrections

From the data of each single science window, prepared by the standard ISDC preprocessing, selected IBIS housekeeping (HK) data are first analyzed to prepare correction parameters for the scientific analysis. The HK tables reporting the initial status (on/off) of detector pixels, their low energy thresholds and their status evolution during the observations are decoded and the information organized to allow computation of livetime of each single pixel during the science window. The deadtime

and its evolution is computed from the countrates reported in the HKs for the different IBIS datatypes, also including the time loss of random coincidences during veto rejection or calibration source tagging.

The ISGRI event pulse height channel and risetime information in the science data list are then used to reconstruct event deposited energy (in keV) by correcting the pulse height amplitude for the charge loss effect and for gains and offsets (Lebrun et al. 2003). The correction is performed using look-up tables (LUT) derived from ground and inflight calibrations (Terrier et al. 2003). PICsIT energies are reconstructed on board using gain and offset LUT before histograms are accumulated. A further correction on the PICsIT single events can be performed on ground by using pixel gain and offsets values refined according to temperature variations (Malaguti et al. 2003).

4.2. Image binning and uniformity-background correction

For each pointing science window the event list or the histograms are then binned in detector images for the specified energy bands and for a given risetime interval. The procedure computes an efficiency (or exposure) map combining informations from good time intervals, telemetry or data gaps, dead-times, livetime of each pixel, and low energy thresholds. The map gives an exposure of each pixels considering all these effects and relative to an effective exposure time of the pointing.

ISGRI images are then enlarged to 130×134 pixels and PICsIT images to 65×67 pixels to include the deadzones between the modules. Residual noisy pixels, i.e. pixels with large values ($>5-10\sigma$) above the average are then identified and efficiencies of noisy and deadzone pixels are set to 0. The detector image pixels are divided by the non-zero-values of the efficiencies to renormalize their values. For efficiencies equal to 0 the weighting array W is set to 0 and the pixels are not included in the image or spectral reconstructions. The correction for detector and background non-uniformity is then applied using the background images derived from empty field observations and the detector uniformity maps (Terrier et al. 2003; Natalucci et al. 2003). For the spectral extraction however the correction is not performed at this level, background and non-uniformity are accounted for directly in the fitting procedure.

4.3. Iterative sky image reconstruction and cleaning

From the corrected detector images the analysis procedure decodes the sky images using the algorithm described in Sect. 2 and iteratively searches for significant peaks in the image. The signal to noise levels (S/N) of detection can be set by the users, and the search can be preferentially performed or even totally restricted to the sources included in an input catalogue. The search procedure is a delicate process due to the presence of the 8 ghosts (per source) and is sensitive to the choices of the S/N levels of search in particular if the background is not fully corrected. The first significant peak is detected and fitted with an analytical approximation of the SPSF to finely determine the position of the source and its flux (Gros et al. 2003). The model of the shadowgram projected by the source

at the derived position is computed, decoded, normalized to the observed excess and subtracted from the image. Such a source response model must take into account the mask element thickness, the effects at the mask border, the different opacity of the mask support and of the passive shield, and the transparent zones in or between these elements. However the model includes only the geometrical absorption effects. Proper account of scattering and energy redistribution is included in the energy response. The same routine which computes the model of source shadowgram on the detector is used in the spectral extraction. The source parameters (position, flux, and signal to noise) are stored in an output file and the procedure uses the source catalogue to identify the source. A second excess is then searched and cleaned and the procedure continues till all sources or excesses are identified and cleaned. The image of the main peak of each source is finally restored in the sky image while the secondary lobes are excluded. Units of intensity images are in reconstructed counts per second for an on-axis source, and a variance image is computed in the proper units.

4.4. Image mosaic and final image analysis

The reconstructed and cleaned sky images of each pointing science window are then rotated, projected over a reference image and summed after a properly weighting with their variance and exposure time. There are two ways to implement the rotation of an image. Either the pixel value is redistributed around the reference pixels on which is projected or its value is entirely attributed to the pixel whose center is closer to the projected center of the input pixel. In the first case the source is slightly smoothed and enlarged but the source centroid is well reconstructed, while in the second case discrete effects can produce a bias in the source centroid but the intensity will be better reconstructed and the source less spread.

After the mosaic step is completed the routine restart the search and analysis of point sources in the mosaicked sky image, again using a catalogue for the identification. Results of fluxes and positions are reported in output. Since the point source location error is inversely proportional to the source signal to noise (Gros et al. 2003), location of weak sources is better carried out on mosaicked images. Note that the search for significant excesses (both for single pointing and for the mosaic) must be performed taking into account that these are *correlation images* and considering the number of independent trials that are made by testing all pixels of the reconstructed sky image. The critical level at which an unknown excess is significant must be increased from the standard 3σ value to typically $5-6\sigma$ (see e.g. Caroli et al. 1987). In the case of residual (background) systematic modulation, the detection level must be further increased (for example by a factor given by the ratio of measured to computed image standard deviation).

4.5. Source spectra and light curve extractions

Once the positions of the active sources of the field are known, their fluxes and count spectra are extracted for each pointing science window in predefined energy bins. Detector images and

their efficiencies are built for these energy bins, enlarged and then searched for residual noisy pixels. For each source and each energy band a shadowgram model is then computed using the detailed modelling algorithm described above. If $P_{kl}^n(\Delta E_h)$ is the model for the source n and the energy bin ΔE_h , the total sky plus background model T at the pixel k, l is defined as

$$T_{kl}^m(\Delta E_h) = \sum_{n=1}^m f_n^h P_{kl}^n(\Delta E_h) E_{kl}^h U_C^h + b^h B_{kl}(\Delta E_h) E_{kl}^h$$

where the sum is extended to all “active” sources of the region and where the background image B is derived from the empty field data, the U_C is the estimated detector non-uniformity and E is the efficiency image. This model is fitted to the enlarged and noisy-pixel-corrected detector images $D_{k,l}$ by using the maximum likelihood technique with Poissonian distribution. The optimization gives the multiplicative factors f_n^h and b^h for each energy band which (after proper normalizations and division by the exposure time), provide the source and background count rate spectra. It is important to perform the simultaneous fit for the models of all the active sources of the field to avoid contamination by other sources of the interested spectrum. Spectra of the same source collected in different pointing science windows can then be summed to obtain an average spectrum during an observation. The spectra are compared to physical spectral models convolved with the energy response function of the instrument (Laurent et al. 2003) in order to evaluate source physical parameters. Finally, a similar procedure, where the images are binned in large energy bands and small time intervals, provides source light curves on time bins shorter than science windows for the predefined active sources in the field of view. For PICsIT operating in standard mode, light curves of the count rates registered by the whole detector can be generated directly from the spectral timing data and used to search for characteristic variability signatures like pulsations or bursts.

5. Final remarks

The software has been tested using inflight data in several conditions and the performance is satisfactory considering the early phase of the mission. Background corrections have been already implemented for the analysis of PICsIT data while not yet fully used for the ISGRI analysis (but see Terrier et al. 2003). Figure 5 shows the correction operated on the Crab nebula PICsIT images as described in Sect. 3. In Fig. 6 the resulting sky image mosaic obtained from the IBIS scientific pipeline applied to about 130 elementary pointings on Cygnus X-1, illustrate the quality of the scientific analysis presently available. Images are well reconstructed and cleaned and sources well detected and finely positioned, with typical absolute error radii (90% confidence level) of less $1'$ for strong source ($S/N > 30$ – 40) and less than $3'$ for moderate or weak ones ($S/N \approx 10$ – 40) (Gros et al. 2003). Figure 7 shows a reconstructed PICsIT image of the Crab, a very bright constant and pointlike source for IBIS, often used as calibration source for high energy instruments. Figure 8 reports a reconstructed Crab count spectrum obtained with the described scientific analysis procedures from the ISGRI data of an observation pointed

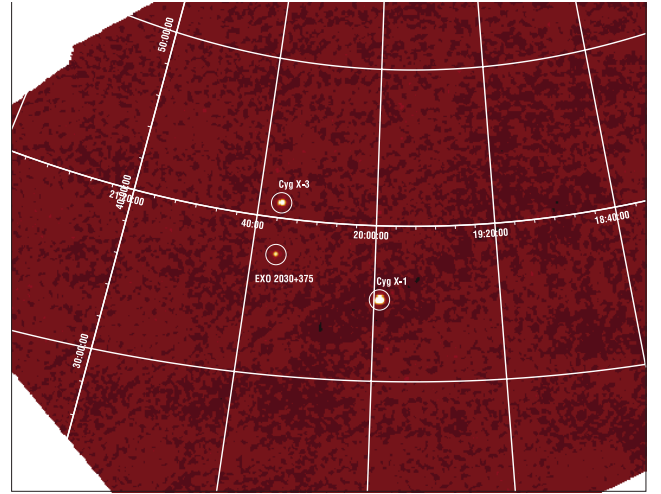


Fig. 6. Sky image mosaic of the Cygnus region in the 15–40 keV band composed with IBIS/ISGRI data from 130 pointings for a total exposure of 145 ks. Three sources are detected at high significance level: Cyg X-1, Cyg X-3 and EXO 2030+375.

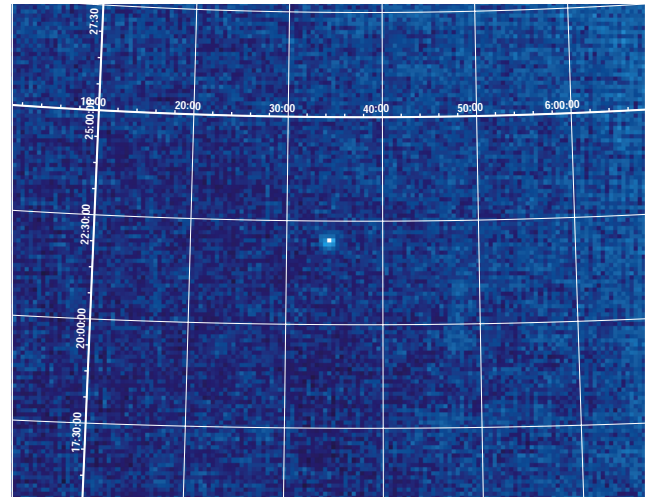


Fig. 7. IBIS/PICsIT reconstructed image of the Crab in the energy band 252–329 keV obtained from the IBIS scientific pipeline applied to 55 science windows for a total of 132 ks of exposure.

on the source and performed in *staring mode* (constant attitude asset during the observation, see Winkler et al. 2003). The spectrum is compared to a model of a simple power law using the instrument energy response files. The best fit in the range 20–700 keV is found for a slope of 2.05 which is compatible with the high energy spectrum of the Crab. To have acceptable χ^2 , systematic errors of about 10% have to be included.

These examples give an idea of the performance of the analysis s/w and of the calibration and response files presently available. The procedures described here have been integrated in the ISDC analysis system and constitute the core of the IBIS data analysis software of the Quick Look and Standard Analysis run at the ISDC and of the INTEGRAL Data Analysis System package. The IBIS analysis software and associate calibration files are constantly improved and integrated in the

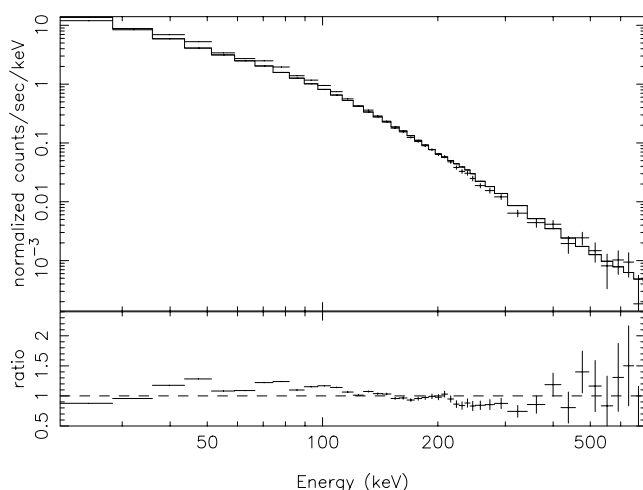


Fig. 8. IBIS/ISGRI reconstructed count spectrum of the Crab from data of a 90 ks exposure pointed observation. The best fit model of a power law and ratios are also shown. The ratios show presence of 10% systematic errors in particular in the 20–100 keV range.

following versions of the ISDC system. The present set has already been used to derive a number of interesting results from the IBIS data of the high energy sources observed with INTEGRAL (see this volume).

Acknowledgements. A. Gros and P.D. acknowledge financial support from the French Spatial Agency (CNES). L.F. acknowledges financial support from the Italian Spatial Agency (ASI) and the hospitality of the ISDC.

References

- Bird, A. J., Barlow, E. J., Bazzano, A., et al. 2003, *A&A*, 411, L159
 Bouchet, L., Roques, J.-P., Ballet, J., Goldwurm, A., & Paul, J. 2001, *ApJ*, 548, 990
 Caroli, E., Stephen, J. B., Di Cocco, G., Natalucci, L., & Spizzichino, A. 1987, *Space Sci. Rev.*, 45, 349
 Courvoisier, T. J.-L., Walter, R., Beckmann, V., et al. 2003, *A&A*, 411, L53
 Di Cocco, G., Caroli, E., Celesti, E., et al. 2003, *A&A*, 411, L189
 Fenimore, E. E., & Cannon, T. M. 1978, *Appl. Opt.*, 17, 337
 Fenimore, E. E., & Cannon, T. M. 1981, *Appl. Opt.*, 20, 1858
 Goldwurm, A. 1995, *Exper. Astron.*, 6, 9
 Goldwurm, A., Goldoni, P., Gros, A., et al. 2001, in *Proc. of the 4th INTEGRAL Workshop*, ed. A. Gimenez, V. Reglero, & C. Winkler, ESA-SP, 459, 497
 Gottesman, S. R., & Fenimore, E. E. 1989, *Appl. Opt.*, 28, 4344
 Gros, A., Goldwurm, A., Cadolle-Bel, M., et al. 2003, *A&A*, 411, L179
 Laudet, P., & Roques, J. P. 1988, *N.I.M.P.R.*, A267, 212
 Laurent, P., Limousin, O., Cadolle-Bel, M., et al. 2003, *A&A*, 411, L185
 Lebrun, F., Leray, J.-P., Lavocat, P., et al. 2003, *A&A*, 411, L141
 Malaguti, G., Bazzano, A., Bird, A. J., et al. 2003, *A&A*, 411, L173
 Natalucci, L., Bird, A. J., Bazzano, A., et al. 2003, *A&A*, 411, L209
 Paul, J., Ballet, J., Cantin, M., et al. 1991, *AdSpR*, 11, 289
 Segreto, A., Labanti, C., Bazzano, A., et al. 2003, *A&A*, 411, L215
 Skinner, G. K. 1995, *Exper. Astron.*, 6, 2
 Terrier, R., Lebrun, F., Bazzano, A., et al. 2003, *A&A*, 411, L167
 Ubertini, P., Lebrun, F., Di Cocco, et al. 2003, *A&A*, 411, L131
 Winkler, C., Courvoisier, T. J.-L., Di Cocco, G., et al. 2003, *A&A*, 411, L1

The INTEGRAL IBIS/ISGRI System Point Spread Function and Source Location Accuracy[★]

A. Gros¹, A. Goldwurm¹, M. Cadolle-Bel¹, P. Goldoni¹, J. Rodriguez^{1,5}, L. Foschini², M. Del Santo³, and P. Blay⁴

¹ CEA Saclay, DSM/DAPNIA/SAp, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

² IASF/CNR, sezione di Bologna, via Gobetti 101, 40129 Bologna, Italy

³ IASF/CNR, sezione di Roma, via del Fosso del Cavaliere 100, 00133 Roma, Italy

⁴ GACE, Instituto de Ciencia de los Materiales, Universidad de Valencia, PO Box 22085, 46071 Valencia, Spain

⁵ Integral Science Data Center, Chemin d'Écogia 16, 1290 Versoix, Switzerland

Received 18 July 2003 / Accepted 9 October 2003

Abstract. The imager on board INTEGRAL (IBIS) presently provides the most detailed sky images ever obtained at energies above 30 keV. The telescope is based on a coded aperture imaging system which allows to obtain sky images in a large field of view ($29^\circ \times 29^\circ$) with an angular resolution of $12'$. The System Point Spread Function of the telescope and its detailed characteristics are here described along with the specific analysis algorithms used to derive the accurate point-like source locations. The derived location accuracy is studied using the first in-flight calibration data on strong sources for the IBIS/ISGRI system. The dependence of the calibrated location accuracy with the signal to noise ratio of the sources is presented. These preliminary studies demonstrate that the IBIS/ISGRI telescope and the standard scientific analysis software allow source localizations with accuracy at 90% confidence level better than $1'$ for sources with signal to noise ratios >30 over the whole field of view, in agreement with the expected performances of the instrument.

Key words. methods: data analysis – techniques: image processing – techniques: high angular resolution

1. Introduction

The IBIS telescope (Imager on Board of the INTEGRAL Satellite) (Ubertini et al. 2003), launched onboard the major ESA gamma-ray space mission INTEGRAL (Winkler et al. 2003) on October 2002, is a hard X-ray/soft γ -ray telescope based on a coded aperture imaging system (Goldwurm et al. 2001). The IBIS imaging system and the IBIS scientific data analysis are described in Goldwurm et al. (2003). Here we discuss more in detail the specific image data analysis procedures used to evaluate the point source locations and we present the characteristics of the System Point Spread Function obtained with the implemented analysis. We also provide preliminary results on the source location accuracy obtained from the first in-flight calibration data of ISGRI, the low energy (15–1000 keV) detector of IBIS (Lebrun et al. 2003).

2. The IBIS image decoding and the associated System Point Spread Function

In coded aperture telescopes (Dicke 1968; Fenimore & Cannon 1981; Caroli et al. 1987; Goldwurm 1995), the source radiation is spatially modulated by a mask of opaque and transparent elements before being recorded on a position sensitive detector. Reconstruction of the sky image is generally based on a correlation procedure between the recorded image and a decoding array derived from the mask pattern. For the IBIS system, where the mask is built by the replication of a Modified Uniformly Redundant Array (MURA) basic pattern (Gottesman & Fenimore 1989) of the size of the detection plane, the raw image projected on the detector by a source in the Fully Coded Field of View (FCFOV) (sky region from where the recorded source radiation is fully modulated by the mask) will be a shifted version of the mask basic pattern. A source in the Partially Coded FOV (PCFOV) will instead project only a part of the mask pattern. The total recorded image (the shadowgram) is therefore the sum of the shadows projected by all sources in the FOV plus a background term. For those masks patterns for which a *correlation inverse matrix* exists, the case of the IBIS system (Goldwurm et al. 2003), the sky image is reconstructed by correlation of the shadowgram with a decoding array obtained from its correlation inverse matrix (Fenimore & Cannon 1981). For those systems (and with a

Send offprint requests to: A. Gros,
e-mail: Aleksandra.Gros@cea.fr

[★] Based on observations with INTEGRAL, an ESA project with instruments and science data centre funded by ESA member states (especially the PI countries: Denmark, France, Germany, Italy, Switzerland, Spain), Czech Republic and Poland, and with the participation of Russia and the USA.

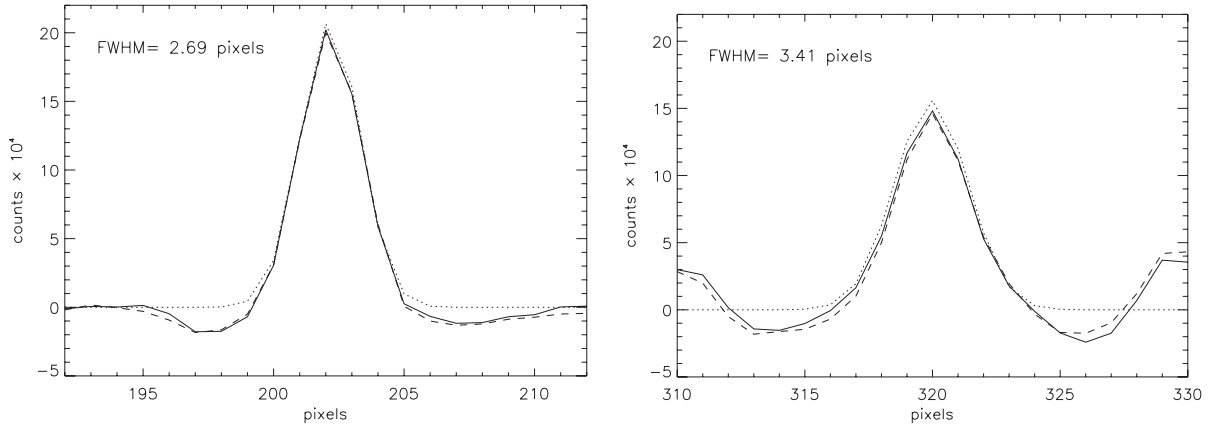


Fig. 1. The ISGRI SPSF compared to the analytical approximation used to fit source positions in the FCFOV (left) and in the PCFOV (right). The reconstructed source profiles (solid line) before normalization to the FCFOV for the Crab and the fitted bidimensional Gaussians (dotted line) are shown (fitted FWHM are 2.69 pixels for the FCFOV and 3.41 pix for the PCFOV). Also shown is the source model profile (broken line) computed at the position derived from the Gaussian fit.

perfect detector) the resulting sky image of a single point-like source in the FCFOV will have a main peak at the source position, flat side lobes in the FCFOV and coding noise with 8 main source ghosts in the PCFOV. For a PCFOV source, a main peak will still be present at the source position but coding noise can extend all over the image starting from the close proximity of the main peak and ghosts will appear in the FOV. The distribution of the coding noise does depend on the mask pattern used. For example URA masks built from quadratic residues (Fenimore & Cannon 1981) have a high degree of symmetry along the axis of the mask, unlike those built from Hadamard arrays (Proctor et al. 1979). This leads the coding noise to concentrate along the image axis passing through the source main peak, producing positive and negative sidelobes (see Fig. 3 in Goldwurm et al. 2003).

We refer to the System Point Spread Function (SPSF) as the spatial response of the system to a point-like source *after* image deconvolution, i.e. considering the decoding process (Fenimore & Cannon 1981). We will discuss here the SPSF relative to the type of deconvolution described in Goldwurm et al. (2003), used in the IBIS standard data analysis and optimized to obtain the best signal to noise (S/N) for point-like sources. This is basically a kind of balanced finely sampled cross correlation (Fenimore & Cannon 1981) extended to the PCFOV (Goldwurm 2001; Goldwurm et al. 2003) and in which the sampling of the decoding array is performed in such a way to weigh the detector pixels with the fraction of transparent or opaque area projected by the mask elements (Sect. 3).

The algorithm implemented is fully described in Sect. 2 of Goldwurm et al. (2003). From the mask array M ($=0$ for opaque elements and $=1$ for transparent elements) two decoding array G^+ and G^- are obtained projecting the arrays M and $1-M$ over a detector pixel grid and padding the zones outside the mask with 0s. Then the sky image S is derived from the detector image D by applying the following operation for each i, j sky pixel and where sums run over all k, l detector pixels

$$S_{ij} = \sum_{kl} G_{i+k, j+l}^+ W_{kl} D_{kl} - B_{ij} \sum_{kl} G_{i+k, j+l}^- W_{kl} D_{kl}$$

where $B_{ij} = \frac{\sum_{kl} G_{i+k, j+l}^+ W_{kl}}{\sum_{kl} G_{i+k, j+l}^- W_{kl}}$ is the balance array and the array W is set to 0 for dead or noisy pixels and to 1 for active good pixels. The correlation performed is balanced in the sense that in absence of sources and with a constant background term, the reconstructed images are flat. The decoded images are then properly renormalized to the reconstructed counts in the FCFOV.

The above deconvolution for a perfect URA coded mask system would provide for a source in the FCFOV a SPSF close to a pyramidal function with totally flat sidelobes in the FCFOV (Fenimore & Cannon 1981). However since the coding is not perfect, due to several instrumental effects like those produced by dead zones between pixels and detector modules and by the supporting structures, the reconstructed image will contain source sidelobes. In the PCFOV sidelobes are inherent to the decoding process even for a perfect detector system and the reconstructed source peak for this decoding procedure can be larger or distorted because of the imperfect coding (Sect. 4). Because of the presence of the ghosts and of the coding noise, the general sky image reconstruction process is an iterative procedure that combine the initial decoding process to the analysis, modelling and cleaning of sidelobes for each source detected in the field. In crowded fields the initial source localization may be disturbed by the presence of other source sidelobes, but as the modelling of the sky is improved during the iterations the localization can improve. However the performances of the localization in this case depends on the number and distribution of sources in the FOV and the performances of the iterative procedure including the convergence criteria used. We present here the characteristics of the SPSF at the first step of the iterative procedure after the first decoding and before the sidelobe cleaning, and we focus on the characteristics of the main peak of the SPSF around the source position.

The main peak angular width will be approximately of the projected angular size of the mask element, i.e. for the IBIS telescope $\approx 12'$ (FWHM). However the exact shape of the SPSF depends also on the detector spatial resolution, the real features of the telescope (e.g. presence of dead and off-pixel zones, mask thickness, etc.) and on the decoding algorithm.

3. Analytical approximation and fitting procedure of the SPSF

The pixels of the IBIS detectors are smaller than the mask elements. The ratio R of the linear mask element size to the linear pixel size is 2.43 for ISGRI. In order to better sample the shadowgram, the corresponding decoding array is also sampled at the pixel scale by redistributing its values according to the fraction of pixel area covered by a given projected mask element. The resulting decoded image has pixels of the angular size of the detector pixels ($\approx 4.94'$). This way of sampling the decoding array before deconvolution optimizes the signal to noise ratio of point-like sources in the reconstructed image, as it takes into account the blurring induced by the finite spatial resolution of the detector (discrete pixels) (Cook et al. 1984).

For this reconstruction the theoretical SPSF peak in the FCFOV is space-invariant and given by the convolution of two square-pyramidal functions with FWHM's equal to w_m , mask element size, and w_p , linear pixel size, respectively. Using the central limit theorem we see that the convolution of these functions can be approximated by a bi-dimensional Gaussian with a width of $w_{\text{spfsf}} \approx \sqrt{w_m^2 + w_p^2}$. For IBIS/ISGRI, using pixel units, $w_p = 1$, $w_m = 2.43$, $w_{\text{spfsf}} = 2.62$. This is slightly worse than the theoretical angular resolution of one projected mask element w_m . The standard imaging analysis procedure of the IBIS data performs, for each detected significant excess in the deconvolved image, a χ^2 fit between an image sector around the source peak and a bi-dimensional Gaussian. The free parameters are the centroid position of the Gaussian (2 parameters), the 2 (variable in PCFOV) widths along the 2 axis, the amplitude of the Gaussian and a constant level (background).

In Fig. 1 we show the reconstructed peak of a strong point-like source for the IBIS/ISGRI system, versus the best fitted bi-dimensional Gaussian, in both the FCFOV (left) and the PCFOV (right). The source is the well known Crab (nebula and pulsar) which was observed with INTEGRAL in February 2003. The best fit Gaussian width is about 2.65 pixels which is compatible with w_{spfsf} . A bi-dimensional Gaussian function is a reasonable approximation of the SPSF peak except for the negative wings around the source, due to the non perfect coding of the detector plane (in the FCFOV mainly due to the dead zones). These side lobes will be corrected using the source model once its fine position is determined. Figure 1 shows also the shape of the peak obtained from the deconvolution of the source model computed a posteriori for the position obtained with the Gaussian fit. One can see that the SPSF shape (including the wings) is well reproduced by the model. However, the computation of such a model and its deconvolution is time consuming and thus difficult to use for fine determination of the source position. The source location is therefore determined by a fitting procedure with a Gaussian function and the errors by the standard computation involving the curvature matrix (Press et al. 1996). The error computation assumes Gaussian distribution of the counts and also independence between pixels. In such decoded image the sky pixels are instead highly correlated in particular on length scales of the mask elements. Moreover the residual background structures may make the distribution

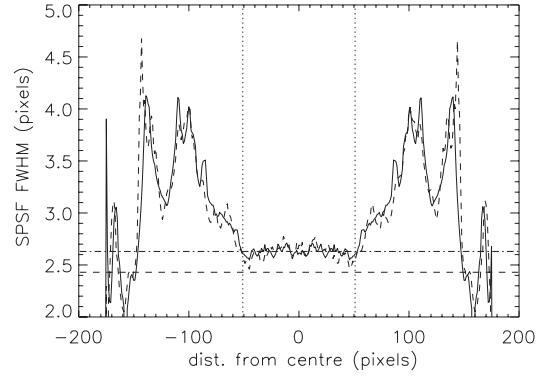


Fig. 2. The variation of the width of the SPSF (for the adopted decoding and before sidelobe cleaning) along the FOV of the IBIS/ISGRI telescope, for the two axis (solid line for the Y axis and broken line for the Z axis). The two horizontal lines indicate the widths w_m and w_{spfsf} and the two dotted vertical lines the limits of the FCFOV.

highly non-Gaussian. While the optimization procedure is still valid, the derived goodness of the fit and error determination may suffer of these conditions. The computed formal statistical error can be underestimated and systematic errors may be dominant, therefore it is important to evaluate the uncertainties using in-flight data and studying the systematic effects in the procedure.

4. The shape of the SPSF in the PCFOV

Outside the FCFOV the SPSF is not space invariant even if the detector plane were perfect, because the optimum properties of the MURA mask are not respected. The shape of the SPSF we obtain for the decoding process applied can be distorted or enlarged (Fig. 1, right). We have studied the properties of the SPSF in the total FOV of the telescope and the performances and limitations of the Gaussian fitting procedure using the source model. Figure 2 shows the fitted width of the SPSF on both axis for source positions all along the FOV. The width is approximately constant in the FCFOV and ranges around 2.6. In the PCFOV however it increases up to values of about 4 pixels ($\approx 20'$). The behavior is symmetric with respect to the image center and similar along the two axis. As a consequence off-axis sources can appear elongated or spread in the reconstructed images.

By studying the offset between the fitted and input source model position, we have derived a measure of the systematic bias introduced by the approximation made for the form of the SPSF. The effect is not large ($< 0.5'$) and can be estimated. An automatic correction of the bias has been included in the localization procedure. From the first analysis of in flight IBIS/ISGRI data, a systematic offset between the IBIS telescope axis and the axis of the satellite star sensors used to reconstruct the absolute spacecraft attitude was found. This predominant ($\approx 8'-10'$) effect, was measured using the localization procedure described here and the available INTEGRAL data. A matrix for misalignment correction was computed (Walter et al. 2003) and included in the localization algorithms which operate the conversion between sky pixels and celestial

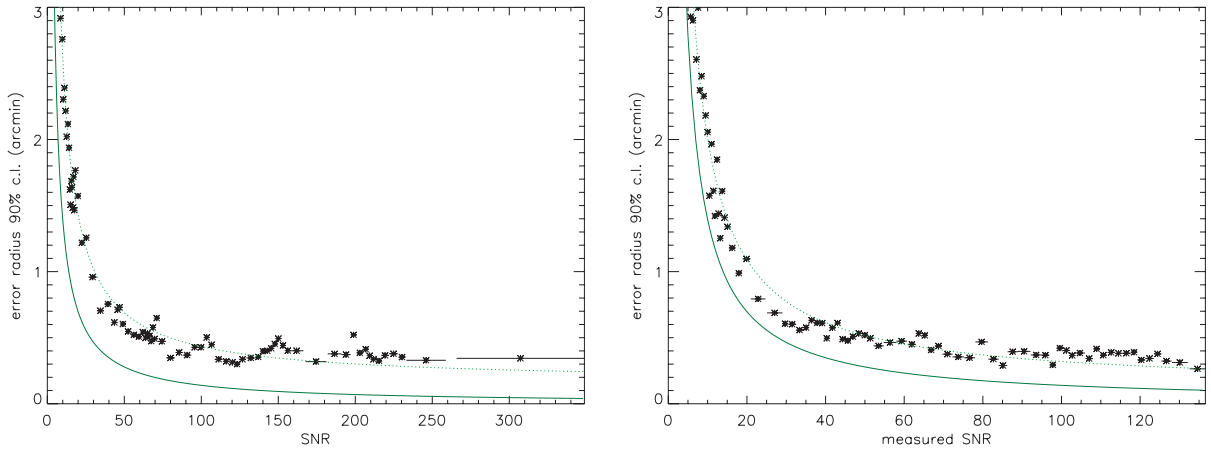


Fig. 3. The 90 % confidence level (c.l.) error radius on the point-like source location of the IBIS/ISGRI telescope vs. the source signal to noise ratio (S/N), as derived from in-flight calibrations. S/N bins include 30 measures of the offset. The values are compared to the theoretical 90% c.l. PSLE (solid line). The plotted data were fitted with a function of the type $y = ax^c + b$ (broken line). *Left:* values derived from ~ 2000 offset measures of reconstructed Crab, Cyg X-1 and Cyg X-3 locations in energy bands between 20 and 300 keV, with source positions ranging between 0° and 14° from the telescope axis. The best fit parameters are $a = 22.1$, $b = 0.16$ and $c = -0.95$. *Right:* Same values plotted versus a *measured* S/N (see text).

coordinates. The imaging software has already provided good results for the source absolute positioning with IBIS/ISGRI data (see this volume for a number of results).

In the following we characterize the performance of the system (the telescope and the software) in term of the point source location accuracy obtained with the most recent version of the IBIS/ISGRI specific analysis software that will be implemented in the October 2003 release of the ISDC Off-line Scientific Analysis (OSA 3.0). The location algorithms have been improved and provide now location accuracies for off-axis sources comparable to those of on-axis sources, therefore with better results than previously reported (Walter et al. 2003).

5. The IBIS point source location error

From the formal errors computed through the curvature matrix, it can be shown that the average Point Source Location (statistical) Error (PSLE) for an optimum coded aperture system with a defined SPSF depends on the source signal to noise ratio (S/N) as $PSLE \propto \frac{1}{R \times (S/N)}$. The S/N is the ratio between the reconstructed source peak and the computed statistical standard deviation associated to the peak pixel. Using computation of such error and simulations performed on a *perfect system* with the geometrical characteristics of the IBIS/ISGRI telescope, we derived the expected PSLE dependence on the S/N (Goldwurm et al. 2001). This curve represents the best theoretical accuracy of point-like source location which can be attained by such a system.

With the described analysis software we have derived the locations of several strong known sources, for different pointings and energy bands. This has provided us with a number of measured source locations in a wide range of S/N ratios and angles from the telescope axis. We have computed the offsets between the derived and catalogue source positions and compared their 90% confidence level dispersion to the theoretical PSLE values. Figure 3 (left) shows the results obtained

combining all measures performed for source $S/N \geq 6$. The S/N bin widths were defined to include a constant number of measured offset values, in order to have similar precision in each bin. Sources at any distance from the telescope axis were measured and no dependence with axis angle or energy is observed. It can be seen that measured offsets are typically comprised between $3'$ and $20''$ and are better than $1'$ for $S/N > 30$. Although the points do not exactly follow the theoretical PSLE curve, there is a clear trend compatible with the expected dependence on S/N (see derived parameters in Fig. 3). At high S/N the dispersion reaches a constant level of about $20''$ which shows the maximal accuracy obtained. Residual systematic effects (for example due to background structures) may still influence the dispersion, and work is in progress to fully evaluate their impact on the source location determination.

In Fig. 3 (right) we report the error radius versus a *measured* S/N rather than the pure statistical S/N . The measured S/N is obtained using a standard deviation computed directly from the reconstructed sky image. In our analysis we measured the standard deviation in a region of $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ around the source after cleaning the side lobes of all sources detected in the FOV and neglecting the source peak regions. This way to evaluate the S/N includes an estimate of the residual systematic errors. The derived offsets are now much closer to the theoretical PSLE curve and indicate that an even better evaluation of location error may be obtained when systematic effects will be fully accounted for.

We stress that these results involve fields with few detected sources. For crowded fields the location estimate may depend on the efficiency of the iterative cleaning algorithm and a full detailed evaluation is not yet available. On the other hand, we have verified that the location accuracy obtained by applying the same algorithm and approximation of the SPSF to mosaicked images (Goldwurm et al. 2003) is further improved. The results we have obtained for selected sources in combined images show that their localization indeed improves for a given

statistical S/N . This may be due to the fact that the systematic effects present in single pointings are smoothed when images are summed. Using Cyg X-1 data, offsets of the order of $5''$ – $10''$ have been obtained for S/N values >300 .

These results show that the IBIS/ISGRI telescope coupled to the analysis procedures we have developed provide point-like source locations with accuracies which fully comply with the expected performance of the instrument.

Acknowledgements. A. Gros and J.R. acknowledge financial support from the French Space Agency (CNES). L.F. and M.D.S. acknowledge financial support from the Italian Space Agency (ASI) and the hospitality of the ISDC.

References

- Caroli, E., Stephen, J. B., Di Cocco, G., Natalucci, L., Spizzichino, A. 1987, *Space Sci. Rev.*, 45, 349
- Cook, W. R., Finger, M., Prince, T. A., & Stone, E. C. 1984, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-31, 771
- Dicke, R. H. 1968, *ApJ*, 153, L101
- Fenimore, E. E., & Cannon, T. M. 1978, *Appl. Opt.*, 17(3), 337
- Fenimore, E. E., & Cannon, T. M. 1981, *Appl. Opt.*, 20(10), 1858
- Goldwurm, A. 1995, *Exper. Astron.*, 6, 9
- Goldwurm, A., Goldoni, P., Gros, A., et al. 2001, *Proc. of the 4th INTEGRAL Workshop*, ed. A. Gimenez, V. Reglero, & C. Winkler, ESA-SP, 459, 497
- Goldwurm, A., David, P., Foschini, L., et al. 2003, *A&A*, 411, L223
- Gottesman, S. R., & Fenimore, E. E. 1989, *Appl. Opt.*, 28, 4344
- Lebrun, F., Leray, J.-P., Lavocat, P., et al. 2003, *A&A*, 411, L141
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P. 1992, *Numerical Recipes* (Cambridge, Cambridge University Press)
- Proctor, R. J., Skinner, G. K., & Willmore, A. P. 1979, *MNRAS*, 187, 633
- Ubertini, P., Lebrun, F., Di Cocco, G., et al. 2003, *A&A*, 411, L131
- Walter, R., Favre, P., Dubath, P., et al. 2003, *A&A*, 411, L25
- Winkler, C., Courvoisier, T. J.-L., Di Cocco, G., et al. 2003, *A&A*, 411, L1

3. Les systèmes binaires X à trou noir dans la Galaxie

La première des sources X extrasolaires (Sco X-1), détectées en 1962 par Giacconi et ses collaborateurs (1963), est la source la plus brillante du ciel dans le domaine X après le soleil. Comme rappelé en chapitre 1, vers la fin des années 1960, ces sources avaient été associées à des systèmes binaires serrés de notre galaxie où une étoile très compacte (trou noir ou étoile à neutrons) accréte la matière de son étoile compagnon. Nous savons aujourd'hui que Sco X-1 et la grande partie des binaires X abritent des étoiles à neutrons, pourtant la véritable découverte des étoiles à neutrons (isolées) a été le fait des radioastronomes. En 1967, Jocelyn Bell et Anthony Hewish avaient détecté le premier pulsar radio, incontestable signature d'une étoile à neutrons fortement magnétisée. La découverte d'une périodicité dans la source X de la nébuleuse du Crabe exactement en phase avec le pulsar radio allait compliquer l'interprétation des mystérieuses sources X. Il fallut en effet attendre la détection du pulsar Cen X-3 et de ses éclipses pour valider complètement l'hypothèse d'une étoile à neutrons fortement magnétisée en système binaire (Schreier et al. 1972) et confirmer, avec la découverte du système orbital de Cyg X-1 (voir chapitre 1.2), le rôle essentiel de l'accrétion dans les binaires serrées.

Dans la période qui suivit ces premières découvertes, les astronomes décelèrent de nombreuses binaires X, associées soit à des compagnons massifs, soit à des compagnons de faible masse de type spectral tardif. Les pulsars X sont en général associés aux systèmes massifs, ils sont distribués le long du plan galactique comme la population des étoiles jeunes et présentent des spectres X relativement durs. Les systèmes de faible masse sont par contre plutôt distribués comme la population stellaire de type II, et concentrés dans le bulbe galactique. Ils ne présentent pas de variabilité à courte période mais plutôt des variabilités liées à la modulation orbitale (éclipses, etc.). Cette classe contient les sources à sursauts X, les *bursters* X (chapitre 1), les sources dans les amas globulaires et les sources brillantes du bulbe galactique. À cette population de sources toujours variables s'ajoutent des sources à émission transitoire. Les sources transitoires à compagnon massif sont, en général, des étoiles à neutrons liées à des secondaires de type Be qui sont en rotation rapide et sont entourées d'un bourrelet, équatorial de matière. Quand, dans son mouvement orbital, l'étoile à neutrons passe au travers du bourrelet le taux d'accrétion augmente et la source entre en éruption.

Par contre, les transitoires associées à des compagnons de faible masse (ou novas X), à l'exception des *bursters* X, sont souvent soupçonnées d'abriter un trou noir.

Les novas X à trou noir ont été les cibles prioritaires de mes recherches sur les binaires X galactiques, même si j'ai aussi participé à des études de sources persistantes comme 1E 1740.7-2942 (Cordier et al. 1993, 1993b), GRS 1758-258 (Gilfanov et al. 1993, Kuznetsov et al. 1999), Cyg X-1 (Kuznetsov et al. 1997). Dans les chapitres 3.1 à 3.4, je présenterai essentiellement une brève revue sur les binaires X à trous noirs. Ensuite, en chapitre 3.5, je relate l'observation de raies spectrales avec d'autres résultats SIGMA. Après un rappel des découvertes les plus récentes (chapitre 3.6), je présente en chapitre 3.7 les résultats INTEGRAL.

3.1 Trous noirs dans les systèmes binaires serrés

Notre galaxie accueille probablement un grand nombre de trous noirs de masse stellaire (les évaluations actuelles sont d'environ 300 millions). Les trous noirs, par définition, sont difficiles à observer, à moins qu'ils soient associés à une étoile dans un système binaire serré. Quand, dans un tel système, un transfert de matière se produit entre le compagnon (l'étoile dite *secondaire*) et le trou noir (l'étoile dite *primaire*), le système peut devenir une source puissante de rayons X. Les sources de rayons X qui semblent associées à des trous noirs dans des systèmes binaires représentent environ 10 % de toutes les binaires X et sont des sources très dures, souvent les objets les plus lumineux aux énergies entre 10 keV et 1 MeV. On les observe souvent émettre des ondes radio et certaines d'entre elle, les *microquasars*, ont été associées à des sources radio à lobes, ce qui implique la présence de jets de particules relativistes (Mirabel et Rodriguez 1999). Dans les 15 dernières années (1990-2005), notre connaissance des systèmes binaires galactiques avec trou noir a augmenté énormément grâce à la grande quantité de résultats obtenue dans les rayons X avec GINGA, ROSAT, ASCA, et maintenant Chandra et MMX-Newton, et dans les X durs et gamma avec ART-P/GRANAT, SIGMA/GRANAT, Compton-GRO, Beppo-SAX, Rossi-XTE et maintenant INTEGRAL.

La luminosité de ces systèmes résulte l'accrétion de la matière fournie par le compagnon. Dans sa chute dans le puit de potentiel du trou noir, la matière accrétée libère son énergie gravitationnelle sous forme de rayonnement de haute énergie. Ces systèmes sont répertoriés en tant que système binaire X massif (*High Mass X-ray Binary*, HMXB), quand la secondaire est jeune, massive (> 1

M_{\odot}) et de types spectraux O et B, ou en tant que binaire de basse masse (*Low Mass X-ray Binary*, LMXB), quand la secondaire est vielle, de basse masse ($\leq 1 M_{\odot}$), et de type spectral tardif (postérieur à A). Les HMXB sont généralement des systèmes étendus avec des périodes orbitales $P_O > 5$ jours et l'accrétion se produit habituellement par capture de vents stellaires forts issus du compagnon. Il n'est pas toujours clair si un disque se forme. Dans les systèmes LMXB plus serrés, à périodes courtes ($P_O \sim$ quelques heure à 10 jours), la secondaire remplit son lobe de Roche et la matière est accrétée avec un moment angulaire important, souvent par un disque d'accrétion. La dissipation visqueuse de l'énergie cinétique dans le disque chauffe le gaz à des températures élevés et génère le transport du moment vers l'extérieur, avec la chute en spirale du plasma vers le trou noir (Fig. 3.1, gauche).

Tous ces objets sont variables mais certains sont visibles la plupart du temps (sources persistantes) tandis que d'autres passent la majeure partie de leur évolution dans un état de quiescence, ils sont alors très faibles et même indétectables (sources transitoires). Évidemment, la classification dépend, en quelque mesure, du niveau de sensibilité des instruments et est, quelques fois, arbitraire. Certaines transitoires peuvent atteindre un état où elles sont en activité pendant de long périodes de temps, montrant une variabilité erratique du flux (GRS 1915+105). Certaines sources persistantes peuvent passer des longues périodes dans un état très bas d'activité (GRS 1758-258, GX 339-4). Les transitoires sont particulièrement intéressantes car, pendant leur période de quiescence, quand l'émission du disque est faible, les observations dans le visible et l'infrarouge de spectrophotométrie peuvent fournir des mesures de vitesse radiales de la secondaire et ceci permet la détermination de la fonction de masse du système (chapitre 1). La masse de la primaire peut être estimée en plaçant des limites appropriées sur la masse de la secondaire (après avoir identifié le type spectral et la classe de luminosité) et des contraintes raisonnables sur l'angle d'inclination du système. Pour des masses $> 3 M_{\odot}$ (chapitre 1) l'objet compact est alors répertorié comme trou noir (par mesure dynamique).

Nous connaissons actuellement 18 systèmes binaires dans notre galaxie et dans les nuages de Magellan, pour lesquels la masse de l'objet compact a été déterminée (ou contrainte) à des valeurs supérieurs $3 M_{\odot}$. Parmi ces systèmes, 3 sont des HMXB, les sources persistantes Cyg X-1, LMC X-1, LMC X-3, les autres sont tous des novas X. Une détermination récente d'une masse de trou noir stellaire galactique concerne GRS 1915+105, le premier microquasar superluminique, qui contient le trou noir le plus massif ($\sim 14 M_{\odot}$) des systèmes binaires à trous noirs connus (Greiner et al. 2001).

Quand la fonction de masse ne peut pas être déterminée, des sources X peuvent être identifiées en tant que candidats trous noirs sur la base des propriétés spectrales et de variabilité de leur rayonnement X et gamma. En particulier, l'absence des marques distinctives de variabilité des systèmes avec étoiles à neutrons (périodicité cohérente, sursauts de type I et II), la présence d'une forte composante dure qui s'étend au delà de 30 keV, celle d'une composante très molle et des signes de variabilité rapide sont utilisés pour la recherche des candidats trous noirs. L'identification de plusieurs sources X comme trous noirs sur la base de ces critères a été plus tard confirmée grâce à des mesures de fonction de masse. Environ 25 sources sont considérées aujourd'hui, sur ces bases, comme des sérieux candidats trous noirs. Trois d'entre elles sont des sources quasi persistantes, la source variable GX 339-4 et les deux microquasars de la région du centre galactique 1E 1740.7-2942 et GRS 1758-258, probablement des LMXB pour lesquelles aucune contrepartie optique n'a été trouvée. Les autres sources sont toutes membres de la classe des novae X. Les novae X sont des sources transitoires qui manifestent des soudaines et intenses éruptions X qui durent quelques mois avec des périodes de récurrence typiques de quelques dizaines d'années (Tanaka et Shibazaki 1996). Leur nombre estimé dans la Galaxie est d'environ 1000.

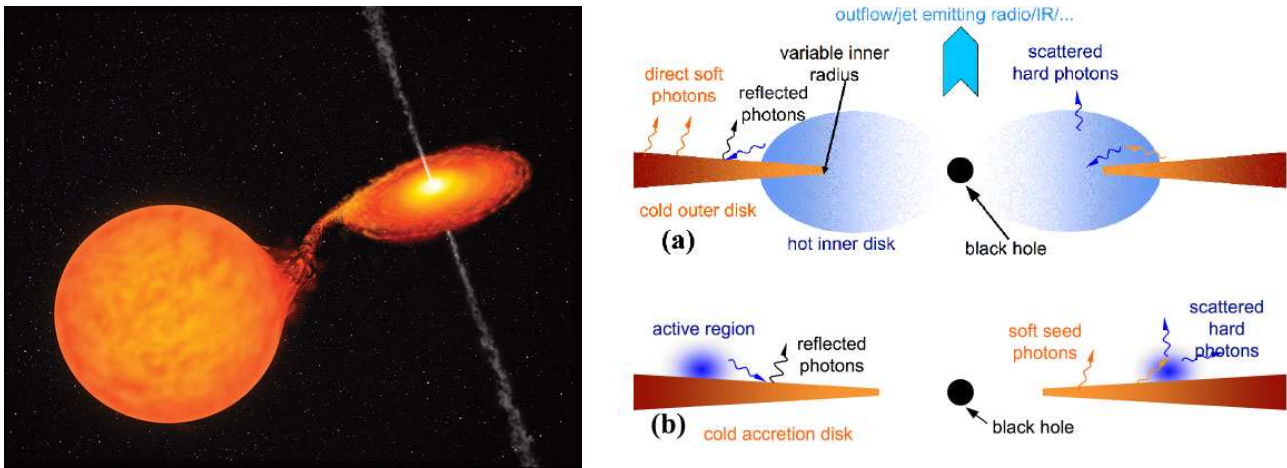


Fig. 3.1 *Gauche* : Vue d'artiste d'un système binaire X de faible masse. *Droite* : Vue schématique d'un modèle possible expliquant les deux principaux états des trous noirs: a) un nuage chaud à l'intérieur avec un disque tronqué (état LHS) et b) une disque qui s'étend au voisinage du trou noir avec une couronne active au dessus du disque (état HSS) (Zdziarski & Gierlinski 2004).

3.2 Le spectre à haute énergie des systèmes binaires à trou noir

Le prototype de la classe de systèmes binaires à trous noirs est la source persistante et très lumineuse Cyg X-1. C'est une HMXB avec une P_O de 5,6 j, un compagnon de type Iab O9.7 et une masse estimée du trou noir de plus de $6 M_{\odot}$. L'accrétion des vents stellaires de la supergéante génère une émission intense et variable de rayons X. Peu après sa découverte, il a été remarqué que son spectre, se prolongeant dans le domaine des rayons X durs avec une pente en loi de puissance d'indice $\alpha \sim 1.8$ suivie d'une décroissance exponentielle à des énergies > 100 keV, était remarquablement différent des spectres des systèmes binaires avec étoiles à neutrons (Sco X-1). Ce spectre n'est pas expliqué par les modèles thermiques, en particulier par ceux décrivant les disques optiquement épais. Cette émission est généralement interprétée comme due à diffusion Compton inverse (*Comptonisation*) des photons mous (du disque) par les électrons thermiques de haute énergie d'un nuage chaud ($kT \sim 50-100$ keV), ou couronne, qui présente une profondeur optique de diffusion $\tau \sim 1$. Sunyaev & Titarchuk (1980) ont décrit le spectre émergent dans l'approximation $\tau > 1$ et $Kt \ll mc^2$, tandis que Titarchuk (1994) a fourni des expressions analytiques pour le cas relativiste et pour une gamme plus étendue de kT et τ . Des observations menées par ART-P et SIGMA/GRANAT de Cyg X-1 dans la gamme 3-300 keV ont en effet montré la limitation des approximations à la Sunyaev et Titarchuk (Grebenev et al. 1993) mais les données restent compatibles avec des approximations plus réalistes des modèles de *Comptonisation*.

Cyg X-1 montre également, de temps en temps, un spectre dominé par une composante thermique ultra molle avec un pic à des énergies $< 1-2$ keV, qui est généralement interprétée comme l'émission d'un disque d'accrétion géométriquement mince et optiquement épais décrit par Shakura et Sunyaev (1973), ou chaque anneau du disque est porté à une température différente et génère un rayonnement de corps noir à cette température. Dans cet état spectral, la composante en loi de puissance est beaucoup plus faible et plus molle ($\alpha \sim 2,5-3,0$) et absente dans certains cas. En général, la composante molle varie en anti-corrélation avec la composante dure. L'interprétation standard de ces spectres est que les photons qui sont « comptonisés » viennent du disque : quand le taux d'accrétion augmente, l'émission molle du disque augmente également, et elle refroidit, par diffusion Compton, le nuage chaud, en réduisant l'émission dure (Fig. 3.1, droite). Dans les dix dernières années on a observé ces deux états spectraux dans beaucoup d'autres systèmes à trous noirs (Grebenev et al. 1993, Grove et al. 1998, Fig. 3.2). Détecter ces deux composantes spectrales peut être utilisé pour identifier les systèmes binaires accrétants qui contiennent probablement un

trou noir plutôt qu'une étoile à neutrons. Malgré le fait que certaines binaires avec étoile à neutrons montrent de temps en temps des composantes dures et molles, et même un certain type de transition spectrale, nous savons maintenant identifier des trous noirs par leurs spectres de haute énergie. Les systèmes avec étoiles à neutrons sont généralement beaucoup plus mous, particulièrement quand ils sont lumineux.

La cause principale est que la surface de l'étoile à neutrons ou la couche frontière entre le disque et la surface sont des sources abondantes de photons mous et donc elles contribuent à refroidir par diffusion Compton la couronne à des températures généralement bien inférieures à celles observées dans les systèmes avec trous noirs. Les systèmes avec étoiles à neutrons plus faibles (les *bursters* X ou les sources « atoll » dans leur état bas) peuvent imiter le comportement montré par les systèmes à trous noirs mais à des luminosités basses et, de toute façon, dans des cas exceptionnels. La grande quantité de données rassemblées dans les 15 dernières années a également permis de caractériser les états spectraux et les propriétés de variabilité des sources à trous noirs et les questions qui se posent maintenant concernent la géométrie et l'origine physique de la couronne et les mécanismes qui régissent les transitions des états spectraux.

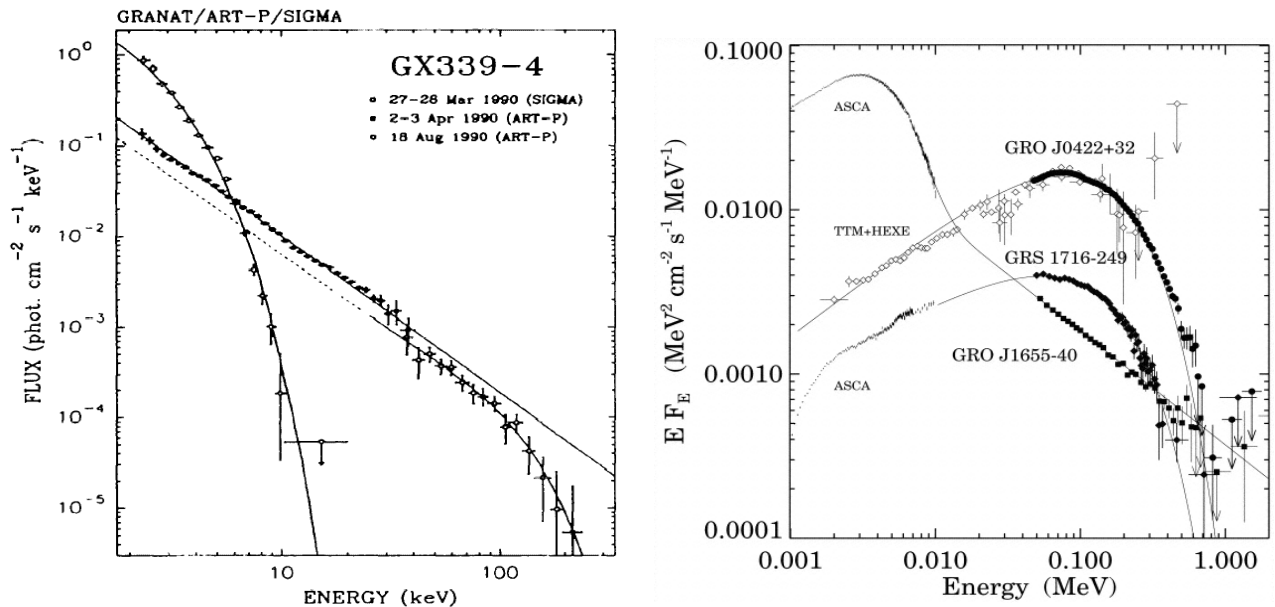


Fig. 3.2 *Gauche:* Spectres SIGMA – ART-P/GRANAT du système à trou noir galactique GX 339-4 dans l'états HSS et LHS (Grebenev et al 1993). *Droite:* spectres combinés ASCA, TTM et CGRO de 3 novas X à trous noirs (Grove et al 1998) dans l'un ou l'autre des 2 états spectraux principaux (LHS et HSS).

3.3 Etats spectraux, transitions et variabilité dans les binaires à trous noirs

Cinq états canoniques ont été identifiés dans les binaires X à trous noirs : l'état très haut (*very high state*, VHS), l'état haut et mou (*high soft state*, HSS), l'état intermédiaire (*intermediate state* IS), l'état bas et dur (*low hard state*, LHS) et l'état de quiescence (*quiescent state*, QS) (van der Klis 1995, Mendez et al. 1999). Ces états sont caractérisés par des combinaisons différentes des composantes spectrales ultra molle, dure et de réflexion (excès dans le continuum, raie de fluorescence et bande d'absorption K) (Fig. 3.3, gauche, voir aussi Fig. 3.4 et 3.11) et sont couplés à différentes propriétés de variabilité (Fig. 3.3, droite).

Le HSS est caractérisé par une forte composante thermique ultra molle avec une composante en loi de puissance à plus haute énergie faible et molle ($\alpha > 2,5$), voir absente. Le spectre en LHS est par contre dominé par une composante en loi de puissance dure ($\alpha \sim 1,5 - 2,0$) avec coupure exponentielle comme décrit auparavant. Le VHS ressemble au HSS avec, par contre, une composante en loi de puissance molle mais très intense (spectre de GRO J1655-40 dans Fig. 3.2 droite) et se prolonge à haute énergie (200-300 keV) sans trace de coupure exponentielle. Le IS est similaire au VHS (le deux composantes sont présentes) mais avec un niveau d'émission plus faible.

Le QS est observée dans les novas X et il est caractérisé par une luminosité très basse ($< 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$). Pendant cette phase, la matière est transférée à partir du compagnon à un taux très bas et elle est stockée dans un disque d'accrétion de faible viscosité, sans accrétion effective par l'objet compact. L'éruption de la nova X est déclenchée par une instabilité thermique qui se propage dans le disque quand la température dépasse une certaine valeur, et qui produit une chute soudaine de la matière du disque. L'accrétion effective augmente, atteint son maximum en quelques jours et décroît (souvent avec une loi exponentielle) en plusieurs semaines. Le taux d'accrétion et l'émission générée pendant ces éruptions varient donc de plusieurs ordres de grandeur sur des périodes de quelques mois et on peut observer les transitions entre différents états spectraux. Au début d'une éruption, les rayons X durs atteignent habituellement le maximum en premier la composante molle se développe ensuite, la nova entre alors l'état VHS puis l'état HSS, elle tend ensuite à évoluer dans l'état IS puis dans l'état LHS avant de rejoindre la quiescence. La séquence des états semble être pilotée par la variation du taux effective d'accrétion. A noter que ce schéma n'est pas toujours suivi,

par exemple certaines novae X (GRO J0422+32) ont été observées pendant toute la durée du sursaut dans l'état dur.

En plus des variations à long terme, les systèmes binaires X à trous noirs montrent également des variabilités non périodiques rapides à des échelles temporelles comprises entre plusieurs centaines de secondes et quelques millisecondes. Les états spectraux sont associés aux propriétés spécifiques de cette variabilité rapide, qui est généralement décrite par le spectre de puissance (*power spectral density*, PSD) (Fig. 3.3 droite) (van der Klis 1995). Dans l'état LHS, la PSD montre un important niveau de variabilité (20-35 % rms), avec une pente plate à basse fréquence jusqu'à une fréquence de coupure (*break frequency*) ν_B ($\sim 0,1$ -1 Hz) et avec une pente en loi de puissance d'indice ~ -1 à plus haute fréquence. Dans l'état HSS, le niveau de variabilité est par contre très bas (< 5 %) et la PSD a une pente très raide. Dans le VHS (et IS), les deux types de PSD sont observés : l'un similaire à celui du LHS mais avec un niveau intégré de variabilité plus faible (rms < 15 %) et avec $\nu_B > 1$ Hz, l'autre plutôt similaire à la PSD du HSS. Des structures plus ou moins piquées (QPO) ont été aussi détectées dans la PSD des systèmes à trous noirs. Des QPO larges sont observées à basse fréquence (< 1 Hz) dans le LHS tandis qu'on observe des QPO forts et étroits entre 1-10 Hz dans le VHS.

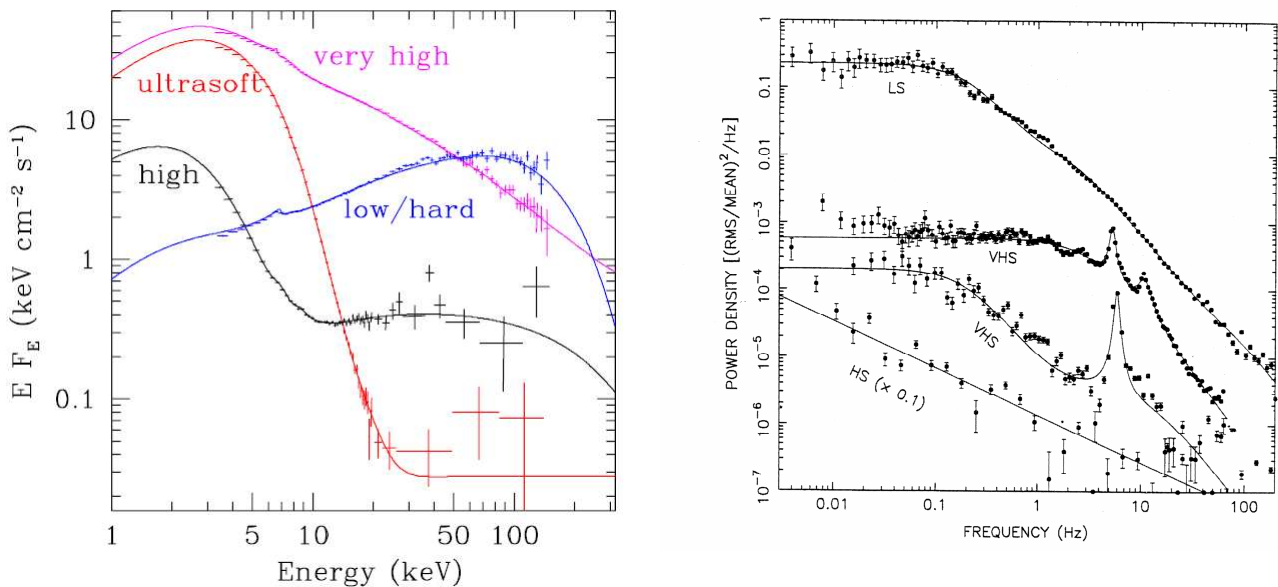


Fig. 3.3 *Gauche*: Spectres de XTE J1550 dans l'état haut mou (HSS) (rouge, noir), très haut (VHS) (rose) et bas dur (LHS) (bleu) (Done & Gierlinski 2005). *Droite*: Spectres de puissance de variabilité (PSD) de systèmes à trous noirs dans différents états (Van der Klis 1995).

3.4 Modèles et composantes à haute énergie

On a proposé différents modèles du flot d'accrétion pour expliquer les spectres des systèmes à trous noirs et leurs transitions d'état (voir par exemple Liang 1998). Ils diffèrent principalement dans l'origine et la géométrie du plasma qui produit la composante dure par comptonisation. Un scénario populaire est que le disque d'accrétion optiquement épais se prolonge jusqu'à un rayon critique qui dépend du taux d'accrétion. Pour des taux proches du régime d'Eddington, le rayon interne (R_{in}) du disque s'étend jusqu'à la dernière orbite stable, l'émission du disque est intense, elle présente un pic à une température $kT_{in} \sim 1-2$ keV et refroidit la couronne chaude en donnant lieu à l'état haut mou (HSS). À des taux d'accrétion plus bas, le disque optiquement épais est tronqué à grands rayons et l'écoulement de plasma dans les parties internes devient chaud, géométriquement épais (un tore ou un nuage quasi-sphérique) et optiquement mince. L'émission du disque diminue et son maximum d'émission se décale vers des énergies inférieures au keV. Le plasma chaud comptonise les photons du disque et produit la composante dure du LHS. Les premières descriptions de ce scénario ont été développées par Shapiro et al (1976) mais se sont avérées instables aux fluctuations thermiques (Pringle 1976). Des solutions hydrodynamiques stables ont été trouvées pour des taux d'accrétion faible, les modèles *advection dominated accretion flow* (ADAF) (voir aussi chapitre 4 pour une description des ADAF), et ils ont été utilisés pour décrire les états des systèmes binaires à trous noirs et leurs transitions (Esin et al 1998). Le disque optiquement épais réfléchit les photons durs et produit ainsi la composante de réflexion visible pendant le HSS mais présente également dans le LHS (Gierlinski et al. 1997, 1999). Elle est caractérisée par une bosse autour de 30 keV, une raie de fluorescence du fer et une structure d'absorption K autour de 7 – 8 keV. La corrélation observée entre la composante de réflexion et la pente de la composante dure, la fréquence de coupure ν_B et l'intensité de la composante molle favorise l'hypothèse que elle est due à la réflexion de l'émission dure de la couronne chaude par le disque épais, les variations étant liées aux changements du rayon interne du disque (Gilfanov et al. 1999). Toutefois, il n'y a pas un accord unanime sur cette corrélation, le VHS n'est pas bien modélisé par ce schéma et les modèles ne sont pas très détaillés.

Des modèles alternatifs proposent que le nuage chaud soit plutôt une couronne enveloppant le disque. Une couronne uniforme ne rend cependant pas compte du faible niveau relatif de la réflexion, qui implique soit une géométrie hautement non homogène (Haardt et al 1992) soit une évaporation ou une dynamique particulière (Malzac et al 2002). Un autre modèle considère les deux

composantes spectrales comme le résultat de deux flots d'accrétion distincts, l'un le long du disque standard, l'autre de type sub-Képlérien chauffé par des chocs au dessus du disque (Chakrabarti & Titarchuk 1995). En tout cas plusieurs questions importantes restent ouvertes. Elles concernent la géométrie du flot (couronne, nuage ou tore), les processus hydrodynamiques et de réchauffage (dissipation visqueuse et reconnections magnétique) et les mécanismes de rayonnement (purement thermique ou non thermique) (Liang 1998, Zdziarski 2000).

Le problème de l'origine de la composante dure prend une importance particulière pendant le HSS ou le VHS, quand la pente est plus molle que pendant le LHS et quand elle ne montre pas de coupure. La possibilité que elle soit due à la comptonisation de photons du disque par le mouvement d'ensemble (*bulk motion Comptonization* ou BMC) des électrons en chute libre vers l'horizon du trou noir a été évoqués par Laurent & Titarchuk (1999). Ce modèle prédit la pente observée mais aussi une coupure à 100-300 keV qui n'a pas été observée. En particulier, une étude détaillée de toutes les données CGRO de Cyg X-1 pendant l'état HSS montre que la source est clairement détectée dans les bandes spectrales 1-3 MeV et 3-10 MeV et que les flux sont compatibles avec une simple extension de la loi de puissance jusqu'à 10 MeV (Mc Connel et al. 2002, Fig. 3.4 gauche). Un modèle alternatif au BMC est le modèle hybride thermique/non thermique (Coppi et al. 1999) qui attribue la composante de haute énergie à l'émission d'une population non thermique d'électrons.

Même si la composante dure du LHS semble bien expliqué par une comptonisation thermique plus une réflexion, une contribution d'une population non thermique a aussi été considérée. La compilation des données Cyg X-1 de Comptel/CGRO (Mc Connel et al. 2002, Fig. 3.4 gauche) semble en effet indiquer dans le LHS un excès au delà de 600 keV par rapport à la composante exponentielle thermique. Nous avons obtenu un résultat similaire avec SIGMA sur les données de la nova X GRO J0420+32 (Roques et al. 1994, chapitre 3.5). Plus récemment, nous avons exploré le spectre de Cyg X-1 avec INTEGRAL et obtenu des résultats intéressants concernant ce sujet (chapitre 3.7).

Un développement récent, lié à la détection des composantes de haute énergie, est l'observation de fortes émissions radio dans les binaires à trou noir pendant leur état LHS. Cette émission est interprétée comme un rayonnement de synchrotron en régime optiquement épais émis par la base d'un jet compact. Elle est fortement corrélée à l'intensité X mais elle disparaît quand la source passe dans l'état HSS. Cela suggère un couplage entre jet radio et composante dure, et donc une

contribution des particules accélérées du jet à l'émission X par effet Compton Inverse ou même par synchrotron (Fender 2001).

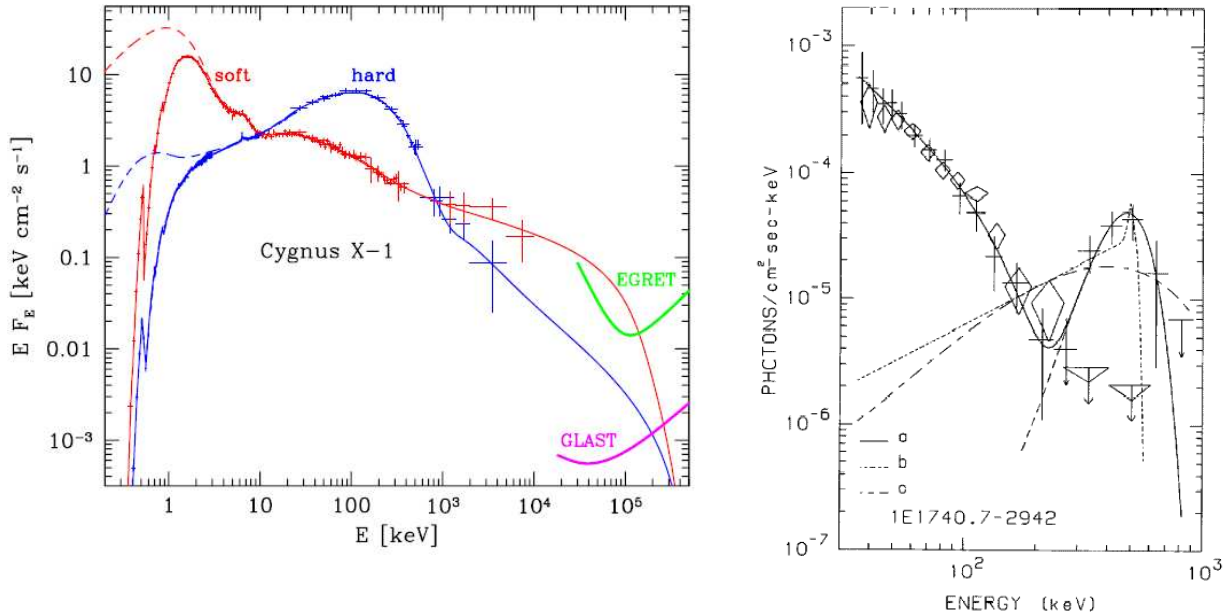


Fig. 3.4 *Gauche* : Spectres de Cyg X-1 dans l'état LHS (bleu) et dans l'état HSS (rouge). Les limites supérieures d'EGRET (état dur) et la sensibilité de GLAST sont aussi indiquées (Zdziarskii & Gierlinski 2004). *Droite* : Spectre de 1E 1740.7-2942 avec l'excès à haute énergie enregistré par SIGMA/GRANAT en 1990 (Bouchet et al. 1991).

3.5 Raies d'émission à haute énergie et contribution SIGMA

A part les composantes à haute énergie persistantes des détections de structures spectrales variables au delà de 300 keV, ont été rapportées pour de systèmes binaires avec trou noir. Ils ont été très suivis pour leur possible liaison avec des processus d'annihilation électron positon et donc avec la présence d'un plasma de paires. La bosse à 1 MeV observée dans Cyg X-1 avec HEAO-3 (Ling et al. 1987) a été la première de telles détections. Cette structure spectrale dans la gamma 400 keV à 1,5 MeV est apparue pendant 14 jours quand Cyg X-1 était dans l'état LHS (état $\gamma 1$ dans l'ancienne nomenclature de Ling et al. 1987). Elle n'a pas été observée depuis.

Nous avons détecté une structure d'émission dans la bande 300-700 keV avec le télescope SIGMA/GRANAT en automne 1990 en provenance du microquasar 1E 1740.7-2942 (Bouchet et al.

1992). Elle a été observée pendant un jour à un niveau de $> 6 \sigma$, et a pu être modélisée avec une raie de profil gaussien assez large, non compatible avec une raie étroite, même compte tenu d'une importante fraction de positronium (Fig. 3.4 droite). L'excès n'était pas présent pendant l'observation effectuée 3 jours avant et le jour suivant l'événement. Une détection ultérieure fin 1991 à un niveau de confiance (4σ) plus bas (Cordier et al. 1993b) n'a pas été confirmée par les observations simultanées de CGRO.

Un autre résultat remarquable obtenu avec le télescope à masque codé SIGMA/GRANAT a été la détection d'une raie variable de haute énergie dans Nova Muscae 91, une nova X à trou noir, pendant son éruption principale. Cela a représenté un des résultats principaux de SIGMA, auquel j'ai contribué directement. Je vais donc décrire plus en détail le travail et les implications astrophysiques concernant cette découverte.

3.5.1 Détection d'une raie d'annihilation électron positon dans Nova Muscae 91

Le 9 janvier 1991, lors d'une observation menée en direction de l'étoile η Carinae, SIGMA détecta sa première nova X tout au bord de son champ de vue. La source, découverte un jour avant avec l'instrument WATCH sur GRANAT était localisée dans la constellation de la Mouche (Musca) à 7° du plan galactique. Dans les mois qui suivirent, SIGMA recueillit plus de 300 heures effectives de données de cette source, appelée Nova Muscae 91 ou aussi GRS 1124-684 (GRS pour GRANAT source), données que j'ai donc analysées pour produire les spectres à haute énergie les plus précis, à cette époque, s'agissant d'une nova X. L'émission s'étendait au delà de 300 keV, signe que l'objet compact était probablement un trou noir. Les résultats de ces observations ont été publiés dans **SIGMA/GRANAT Soft Gamma-Ray Observations of the X-Ray Nova in Musca: Discovery of Positron Annihilation Emission Line**, par Goldwurm et al., 1992 (publication n°. 4) (voir aussi Sunyaev et al. 1992, Goldwurm et al. 1993, Gilfanov et al. 1993).

L'évolution spectrale observée avec SIGMA, ART-P et GINGA montra que la nouvelle source présentait avant tout un spectre dur pour ensuite entrer dans l'état très haut (VHS) dominé par une composante ultra molle qui progressivement arriva au maximum autour du 15 janvier. Une composante intense en loi de puissance ($\alpha \sim 2,3 - 2,7$) s'étendait jusqu'à 300 keV sans la coupure exponentielle typique des modèles de Comptonisation. Toutes les caractéristiques d'une nova X à trou noir étaient réunies et nous avons alors proposé qu'il s'agisse d'un nouveau candidat trou noir.

Quelques années après plus tard Orosz et al. (1996) mesurèrent la fonction de masse et obtinrent une estimation de la masse de l'objet compact de $> 6.5 M_{\odot}$, une éclatante confirmation de nos prédictions.

Le 20 janvier, la source était encore dans son état VHS quand nous avons détecté dans les images SIGMA un excès significatif ($\sim 6 \sigma$) du flux de la source dans la gamme 430 – 530 keV (Fig. 3.5) pendant la dernière partie de l'observation. Comme montré en Fig. 3.6 cet excès n'est pas simplement un excès du flux du continuum mais semble bien une réelle structure spectrale d'émission centrée autour de 500 keV. Cette raie d'émission était centrée à 480 keV avec un flux de $6 \cdot 10^{-3} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ et une largeur de 23 keV (en σ), compatible avec la résolution en énergie de l'instrument et donc intrinsèquement étroite (Fig. 3.6). La raie variable apparut donc pendant 13 heures, quelque jours après que la nova eut atteint le pic de luminosité bolométrique et alors qu'elle se trouvait encore dans l'état VHS. Cette raie fut initialement interprétée comme une raie de l'annihilation électron positon à 511 keV décalée vers le rouge, mais beaucoup de problèmes restent ouverts concernant notamment le mécanisme de production des positons et le site de leur annihilation. Les positons pourraient s'être formés dans la partie interne et très chaude du flot d'accrétion et puis s'être annihilés dans un milieu froid, par exemple dans la partie externe du disque. Cependant le *redshift* observé, interprété en termes de *redshift* gravitationnel, impliquerait un site d'émission proche du trou noir et la raie devrait être élargie par la rotation Képlérienne et par la haute température de ce milieu. De surcroît si les positons sont produits par des interactions photon - photon impliquant des photons d'énergie $> 511 \text{ keV}$ produits par un plasma de paires très chaud, une émission intense continue aurait dû être observé au delà de 500 keV.

Un certain nombre de modèles ont été proposés dans ce cadre. Kaiser et Hannikainen (2002), en remarquant la corrélation de la raie avec le sursaut radio observé quelque jour après, ont suggéré que la raie est produite à l'intérieur d'un jet et que le décalage en fréquence est un décalage Doppler dû au mouvement d'ensemble des positons dans le jet.

Une deuxième structure spectrale semble être présente (avec un degré confiance moindre) à des énergies proches de 200 keV (Goldwurm et al. 2003) et elle a été interprétée comme de la rétro-diffusion Compton de la raie à 511 keV par le bord interne du disque (Hua & Lingelfelter 1993) ou comme le résultat de la distorsion de la raie fine à 511 keV par le mouvement Képlérien et les effets relativistes attendus dans un disque d'accrétion autour d'un trou noir (Hameury et al. 1994).

Une interprétation différente fut proposée quand une quantité importante de lithium fut découvert dans les étoiles secondaires des novae X à trou noir. Martin et al. (1996) proposa que la raie observée pourrait résulter de la raie à 478 keV de la désintégration du ^7Li excité, lui-même généré soit directement par des interactions $\alpha - \alpha$ soit par désintégration du ^7Be produit par des processus de spallation pendant l'éruption. Bien qu'attrayante, cette interprétation rencontre des difficultés car ce mécanisme produirait aussi du ^7Be excité qui générerait une raie vers 430 keV avec intensité similaire à celle à 478 keV. Les deux raies combinées ne ressembleraient donc plus à une seule raie fine dans un instrument à moyenne résolution spectrale comme la caméra de SIGMA. Guessoum & Kazanas (1999), en discutant les scénarios de production de lithium dans les flots chauds de type ADAF, proposés auparavant par Yi & Narayan (1997), et plus généralement en étudiant le processus de nucléosynthèse dans les flots d'accrétion des systèmes binaires X, ont constaté que le lithium serait détruit par des collisions avec des protons ou par photodissociation dans l'écoulement chaud et ne fournirait pas des flux appréciables. D'autre part, ils ont étudié le problème de la production de la raie gamma à 2,223 MeV par capture de neutrons par des protons, en raison des grands flux de neutron obtenus dans le flot d'accrétion qui intercepte la secondaire.

De toute façon, les raies d'émission de haute énergie, transitoires et de telles intensités demeurent des événements rares, car ni SIGMA ni CGRO n'ont jamais détecté de tels structures spectrales dans d'autres novae X ou dans des binaires persistantes (Goldwurm et al. 1997, Grove et al. 1998, Cheng et al. 1998). Les limites supérieures pour des raies de haute énergie dans les systèmes binaires X à trous noirs déduites des données CGRO sont de l'ordre de $5 \text{ à } 15 \cdot 10^{-4} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ pour un jour d'exposition. A noter cependant que ces résultats peuvent être dus à la couverture incomplète des novae X dans l'état VHS au cours de l'activité maximale et s'il s'agit certainement de phénomènes rares, rien ne prouve qu'ils ne peuvent pas se produire à nouveau.

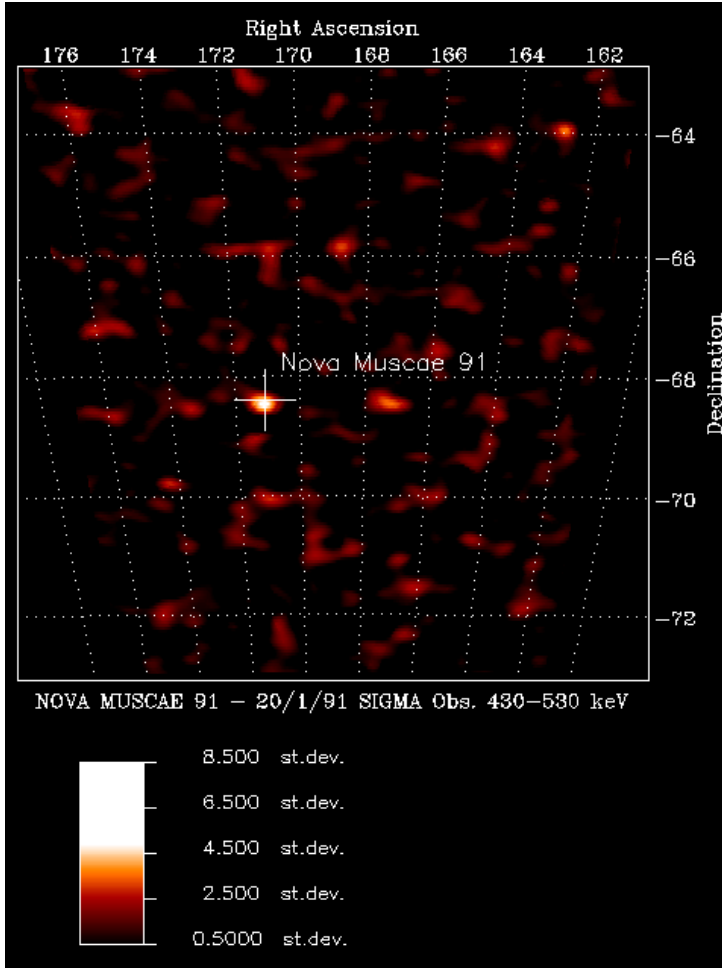


Fig. 3.5 Image du ciel, enregistrée par le télescope Sigma le 20 janvier 1991 en direction de Nova Muscae dans la bande d'énergie 430-530 keV, montrant les excès d'émission par rapport au bruit de fond, codés en unités de déviation standard. En dehors de l'excès significatif (supérieur à 5 déviations standard) que l'on remarque à la position même de la nova de la Mouche (marquée par une croix), il n'apparaît aucun autre excès notable d'émission sur toute l'étendue de l'image.

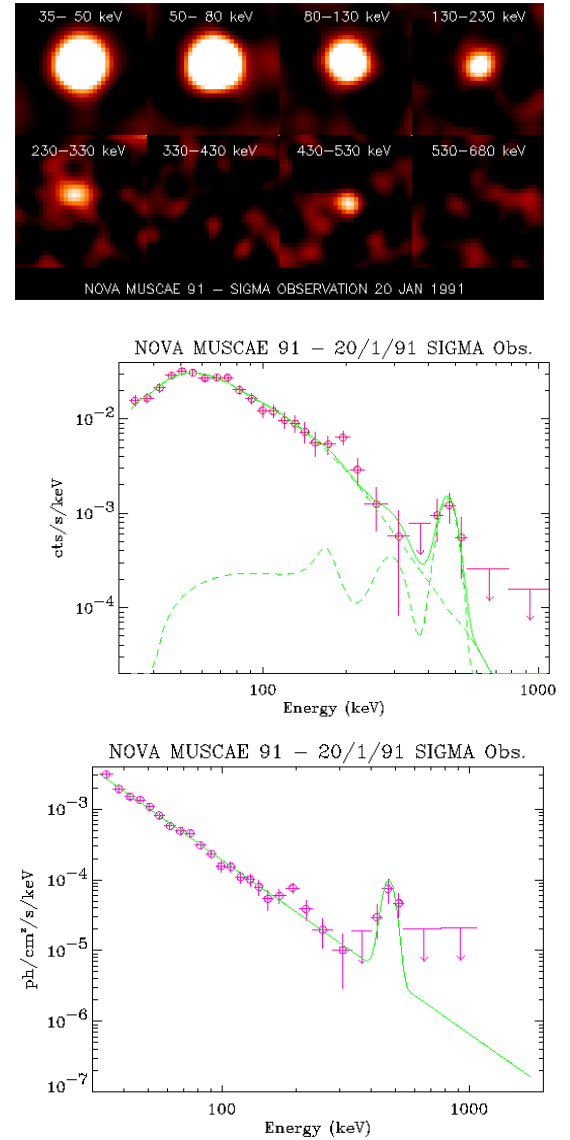


Fig. 3.6 Images SIGMA (*haut*) de $1,5^\circ$ de côté à la position de la nova de la Mouche dans 8 bandes d'énergie adjacentes au cours des 13 dernières heures de l'observation du 20 janvier 1991. La source, très intense dans les 5 premières bandes (énergies < 330 keV), n'apparaît plus dans la 6^{ème} bande (330 - 430 keV) et brille à nouveau dans la 7^{ème} bande centrée autour de 480 keV, avant de disparaître à plus haute énergie. Spectre en coups (*milieu*) et en photon (*bas*) de cette observation, et meilleur modèle spectral (ligne continue) : loi de puissance d'indice 2.4 et une raie gaussienne centrée à 480 keV avec une largeur à mi-hauteur de 55 keV (les limites supérieures sont à 2σ).

3.5.2 Etudes des novas X brillantes et de celles du bulbe galactique avec SIGMA

Grâce à son grand champ de vue, le télescope SIGMA nous a permis de découvrir et/ou d'étudier entre 1991 et 1997, un totale de 8 novas X, dont 4 dans la région du bulbe galactique. L'ensemble des données SIGMA a montré que cette classe d'objets est la classe par excellence des candidats trous noirs (Vargas et al. 1997). Les études de toutes les données SIGMA relatives aux novas X, études auxquelles j'ai activement contribué en collaboration avec mon étudiante en thèse, Marielle Vargas, et un chercheur en stage post-doctoral, Paolo Goldoni, ont apporté de nombreux résultats originaux sur la variabilité et le comportement spectral de ces sources. Ces résultats ont fait partie des progrès scientifiques obtenus au cours des 15 dernières années dans le domaine des systèmes binaires galactiques avec trou noir, que j'ai synthétisé dans les chapitres 3.1 à 3.4.

En plus de la nova de la Mouche, deux autres novas X à trous noirs brillantes ont été vues par SIGMA : Nova Persei 92 (alias GRO J0422+32) (Roques et al. 1994, Finoguenov et al. 1996) et Nova Ophiuchi 93 (GRS 1716-249) (Revnivtsev et al. 1998) (Fig. 3.7 à 3.9). L'étude de ces sources nous a montré qu'elles présentaient un spectre clairement différent de celui de Nova Muscae 91 (Fig. 3.8), plus proche du spectre de Comptonisation de Cyg X-1 en état *Low-Hard*. Nos résultats indiquaient déjà ce que la compilation, plus complète, réalisé avec CGRO et divers instruments X aurait donné quelques années plus tard, à savoir que les novas X montrent deux types différents de spectres gamma (Fig. 3.2 et Grove et al. 1998). Ces spectres sont associés au deux états, LHS et VHS, et dans l'état HSS (ou VHS) le spectre en loi de puissance ne présente pas une coupure. Nova Persei 92 était très intense et même si son spectre montre une cassure spectrale, nous avons pu le mesurer jusqu'à 700-800 keV (Fig. 3.8). Le spectre démontre que la simple Comptonisation thermique à la Sunyaev & Titarchuk (1980) n'explique pas la partie à haute énergie (Roques et al. 1994) (voir chapitre 3.4). Un autre résultat important que nous avons obtenu sur les données de Nova Persei 92 (Denis et al. 1994, Vikhlinin et al. 1995), a été la découverte de variabilité rapide et même de structures dans le spectre de puissance qui impliquent la présence de quasi périodicités (QPO) de basse fréquence. Après la découverte avec SIGMA des QPO dans Cyg X-1, ce résultat a confirmé que les phénomènes des QPO n'étaient pas réservés aux systèmes avec étoile à neutrons.

Plus faibles et plus difficiles à étudier, les novas X du bulbe galactique pouvaient par contre être localisées aisément par SIGMA, même dans les régions centrales de la Galaxie le plus denses, grâce aux propriétés d'imagerie du télescope et aux logiciels de traitement que nous avons développés

(Vargas et al. 1996b). Nous avons ainsi observé et étudié : GRS 1730-312 (Vargas et al. 1996, Trudolyubov et al. 1996), GRS 1739-278 (Vargas et al. 1997), XTE J1755-324 (Goldoni et al. 1999, Revnivtsev et al. 1999), GRS 1737-31 (Trudolyubov et al. 1999). Nous avons aussi étudiée une autre nova dans le plan galactique mais assez faible la Nova X Velorum 93 (GRS 1009-45) (Goldoni et al. 1998). A noter que presque toutes ces sources ont été découvertes tant par SIGMA ou que par WATCH à ord de GRANAT, d'où le nom GRS, pour GRanat Source.

Pour illustrer le type de travail que nous avons réalisé pendant cette époque, je présente un des travaux mentionnés : **SIGMA/GRANAT Discovery of GRS 1739-278, a Hard X-Ray Transient in the Galactic Bulge, par Vargas et al., 1997, publication n° 5**. Cette lettre relate la découverte avec SIGMA d'une nova X dans le bulbe galactique. La source est à seulement 1.4° du centre galactique mais l'image reconstituée et nettoyée de la région centrale de la Galaxie (Fig. 3.10) ne laisse pas d'ambiguïté sur la présence et la localisation de la nouvelle source, même avec le pulsar X GRS 1744-28 alors en activité (voir Fig. 4.3 pour une image SIGMA moyennée de la région du centre galactique). Nous avons pu extraire un spectre entre 40 et 200 keV, déterminer la pente ($\alpha \sim 2,2$) et sa luminosité. Nous l'avons comparée aux mesures en X mou de RXTE pour déduire que la nova était probablement dans l'état mou (HSS) mais avec une composante dure en spectre de puissance. En dépit de la distance, elle peut donc bien être classifiée dans l'état VHS. Le spectre s'arrête par contre à 200 keV et il n'a pas été possible de vérifier la présence d'une raie à 500 keV.

Intrigués par le fait d'observer le même flux maximal dans différentes novas X du bulbe nous avons estimée la luminosité au pic d'émission dans l'hypothèse qu'elles se trouvent toutes à la même distance (~ 10 kpc). Ensuite nous avons estimé la distance d'autres novas X dans l'hypothèse que la luminosité au pic dans une bande d'énergie donnée soit la même dans tous les objets. Cependant les luminosités (par bande) varient remarquablement, non seulement entre différentes sources mais, pour la même source, d'une éruption à l'autre ou d'un état spectral à l'autre. Cette démarche, même si elle s'avère suggestive, semble donc difficile à justifier. Dans sa thèse, Marielle Vargas (1997) (voir aussi Vargas et al. 1997) a présenté une comparaison des caractéristiques spectrales et temporelle des sources SIGMA du bulbe galactique (voir Fig. 4.3) pour déceler des différences notables entre systèmes binaires avec étoiles à neutrons et avec trous noirs. Dans le domaine spectral de SIGMA, les spectres des systèmes avec candidats trous noirs s'avèrent toujours plus durs que ceux des systèmes binaires avec étoiles à neutrons.

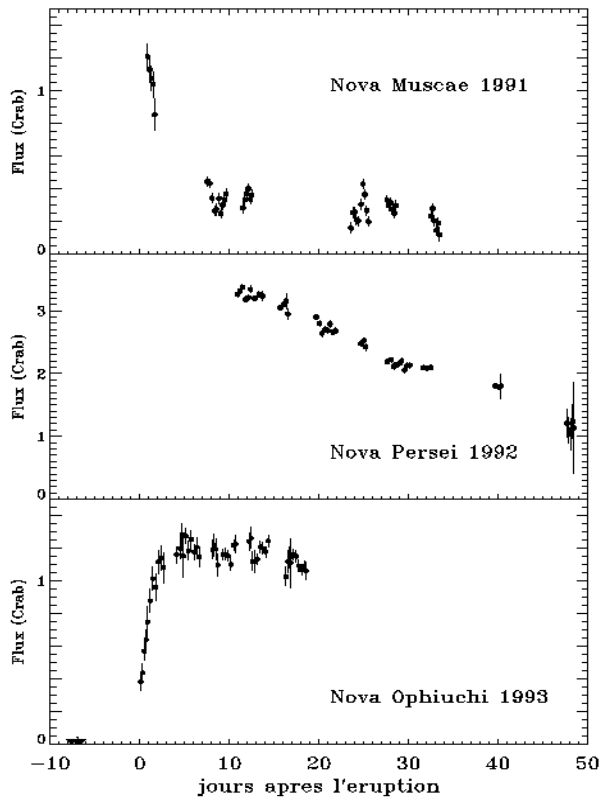


Fig. 3.7 Comparaison des courbes de lumière de 3 novas X brillantes obtenues avec SIGMA dans la bande 40-80 keV.

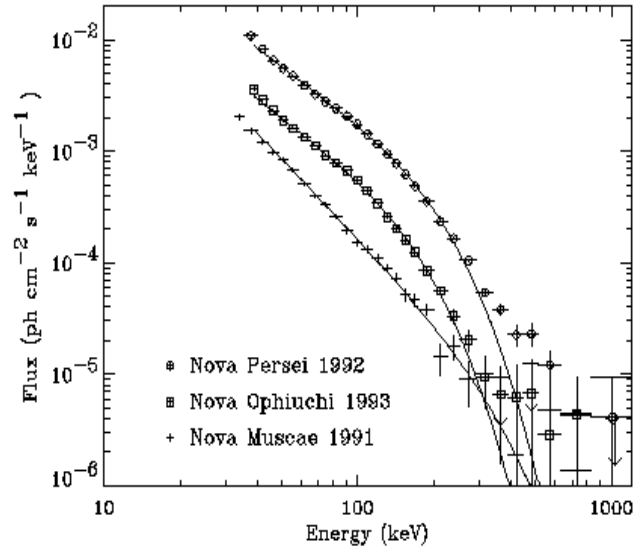


Fig. 3.8 Comparaison des spectres moyens des trois novas X brillantes obtenues avec SIGMA.

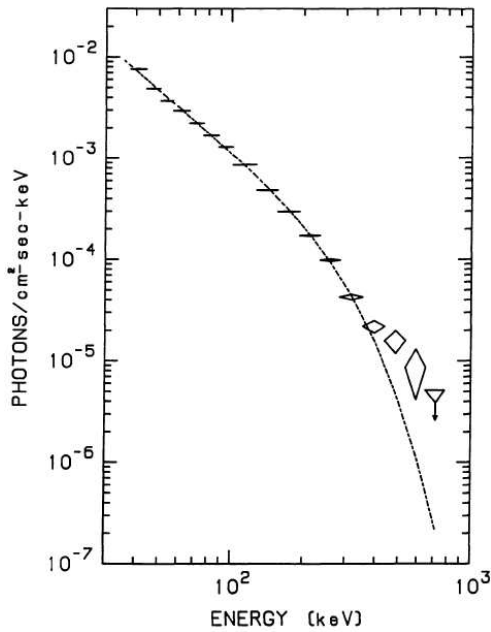


Fig. 3.9 Spectre SIGMA de Nova Persei 92 avec l'excès à haute énergie sur le modèle de Comptonisation (Roques et al. 1994).

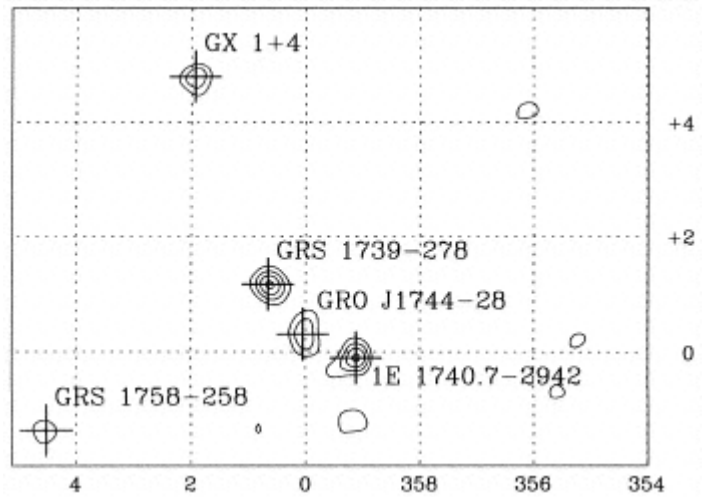


Fig. 3.10 Image SIGMA 40-80 keV de la région du centre galactique en mars 1996 qui montre la nova X GRS 1739-278 à 1.4° du centre (Vargas et al. 1997).

3.6 Résultats majeurs après SIGMA et Compton-GRO

Après l'ère de GRANAT et de CGRO, des résultats majeurs ont été obtenus avec les missions à haute énergie Rossi-XTE (1995), Beppo-SAX (1996-2002), Chandra (1999) et XMM-Newton (1999). Ces missions ont fourni une quantité de données impressionnantes sur les variations spectrales et temporelles des sources à trous noirs dans les bandes X et X durs, données qui ont mis en évidence la phénoménologie complexe de ces objets.

Une découverte importante a été la détection de QPO à haute fréquence avec RXTE (40-450 Hz) dans certains systèmes, notamment dans les deux microquasars superluminiques GRS 1915+105 et GRO 1655-40 (Strohmayer 2001). L'échelle de temps de ces QPO à hautes fréquences implique un site d'émission très proche de l'horizon du trou noir et elles posent des contraintes importantes sur les mécanismes radiatifs et même sur le spin et la masse du trou noir (Greiner et al. 2001).

Les observations de la nova X XTE J1550-564, la plus brillante et la plus lumineuse avec GRS 1915-105, ont montré que la source changeait d'état sur des échelles temporelles de l'ordre de quelques jours à quelques semaines avec peu ou pas de corrélation avec le taux d'accrétion (Homan et al. 2001). Un autre paramètre physique du système (éventuellement lié au champ magnétique) doit donc intervenir, en plus et indépendamment du taux d'accrétion, pour déclencher les changements d'états spectraux.

Que le taux d'accrétion ne puisse pas expliquer toutes les transformations des systèmes à trous noirs est aussi bien démontré par l'état particulier bas/mou (*low/soft state*) que Smith et al. (2001) et nous avons détecté dans le microquasar GRS 1758-258, grâce à des observations XMM (Goldwurm et al. 2001, Miller et al. 2002, Goldwurm et al. 2002, Goldoni et al. 2002). Une étude de variabilité à long terme a montré que, dans cette source, les changements d'états spectraux sont corrélés aux variations de flux plutôt qu'aux valeurs du flux, à la différence par exemple de Cyg X-1.

Avec l'observatoire Chandra, Corbel et al. (2002) ont découvert des jets X autour de la nova XTE J1550-564. Depuis, d'autres jets X, dans certains cas associés à jets radio, ont été identifiés, par exemple dans H 1743-322. Des observations avec XMM-Newton, ont révélé des raies du fer

fortement élargies, déplacées et déformées. Il est fort possible que ces distorsions soient dues aux effets gravitationnels qu'on attend dans les parties internes du disque d'accrétion. Dans GX 339-4, par exemple, Miller et al. (2004) ont pu déterminer, avec la mesure de ces distorsions, que le spin du trou noir dans le système GX 339-4 est 0.8 - 0.9 fois le maximum admissible.

De surcroît, la corrélation non linéaire entre l'émission radio avec spectre plat et la composante dure du spectre X des binaires avec trous noirs a été confirmée, généralisée et même étendue aux noyaux actifs des galaxies (AGN), qui abritent des trous noirs supermassifs. Cette corrélation, $L_R \propto L_X^{0.7}$, est assez bien expliquée par un modèle de jet compact où une émission synchrotron optiquement épaisse rend compte du spectre (plat) radio tandis qu'une émission du même type mais optiquement fine explique le spectre X. Puisque la puissance du jet dépend de la masse du trou noir, une fois la luminosité normalisée à la même masse du trou noir, on retrouve que la même corrélation est valable tant pour binaires que pour les AGN (pour l'état bas/dur des systèmes binaires et pour des régimes sub-Eddington des AGN). Elle semble donc valable pour tous les trous noirs accrétants (de masse stellaire et supermassifs), Sgr A* inclut (voir Falcke et al. 2004 et références citées).

Plusieurs tentatives ont été effectuées pour chercher à comprendre la phénoménologie complexe des états spectraux et des variabilités. Après la classification initiale (celle adoptée au chapitre 3.2), d'autres ont été proposées (Mc Clintok & Remillard 2003, Homan & Belloni 2005), accompagnées de recettes pour décrire les transitions de phase (Fender et al. 2005).

Fender et al. (2004) ont discuté les passages entre différents états sur la base du parcours que la source suit sur un diagramme entre intensité totale et rapport de dureté. Il ont trouvé que la transition clef état dur vers état mou, pendant laquelle un jet relativiste est généré, s'effectue au passage d'une ligne droite à rapport de dureté constant, la *ligne de jet*. D'autres auteurs ont discuté les états et les transitions sur la base des composantes spectrales (disque, comptonisation, réflexion, composante non thermique, etc.) (Zdziarski & Gierlinski 2004).

En définitive nous n'avons pas encore un modèle unifié et cohérent des processus physiques en jeu dans les systèmes binaires X à trous noirs.

3.7 Résultats obtenus avec INTEGRAL

La mission INTEGRAL, avec sa sensibilité dans une large bande spectrale (3 keV - 10 MeV) et ses performances de spectro/imagerie jamais encore atteintes dans ce domaine représente un instrument essentiel pour l'étude des trous noirs galactiques et notamment (grâce à son champ de vue de $30^\circ \times 30^\circ$) des sources transitoires. Dans ce cadre, je me suis consacré, dans les mois précédents le lancement, à développer un programme d'observation INTEGRAL de binaires à trou noir, associées, dans la mesure du possible, à des observations X (RXTE, XMM-Newton), radio et infrarouge. A cause de l'importante compétition internationale sur le sujet, nous avons fait le choix de nous concentrer sur l'étude des sources transitoires ou sur l'étude de sources persistantes quand elles montrent des changements d'état significatifs. Pour cela, nous avons exploité nos droits sur le programme de temps garanti, le programme réservé aux équipes ayant contribué à la réalisation de la mission, et nous avons participé au programme de temps ouvert avec des propositions d'observations ciblées.

Dans ce cadre, nous avons bâti un programme qui nous a assuré pendant les premiers trois ans d'opérations, la participation aux observations suivantes (entre parenthèse les sources effectivement observées) :

- L'observation des nouvelles novas X brillantes (style nova de la Mouche) dans le cadre du temps garanti ;
- L'observation des nouvelles novas X faibles du bulbe galactique dans le cadre du temps ouvert (XTE J1720-312, XTE J1818-245);
- L'observation de nouvelles novas X faibles dans le halo galactique, à haute latitude galactique, dans le cadre du temps ouvert (SWIFT J1753.5-0127);
- L'observation de quelque novas X déjà connues dans le cas d'une nouvelle éruption, dans le cadre du temps ouvert comme dans celui du temps garanti (H 1743-322, 4U 1630-47);
- L'observation de trous noirs persistants ou quasi persistants au cours de changements d'état (1E 1740.7-2972, Cyg X-1).

Malheureusement, il n'y a pas eu dans les trois dernières années d'éruptions de nouvelles novas X intenses (type Nova Muscae 91 ou XTE J1550) et nous n'avons pas pu réaliser une partie du

programme scientifique envisagé, à savoir la recherche de raies d'annihilation dans des novas X similaires à celles de Nova Muscae 91.

Par contre, nous avons pu étudier des sources plus faibles, qui ont démontré des comportements intéressants, et des sources persistantes dont Cyg X-1. Je reprends ici deux résultats d'une certaine importance, l'observation d'une nova X du bulbe dont nous avons étudié une transition d'état spectral et des observations de Cyg X-1, en particulier dans un état intermédiaire pendant lequel la source a montré la présence d'une composante non thermique. Les détails de l'analyse, des résultats et leur interprétation seront présentés dans la thèse de Marion Cadolle Bel.

3.7.1 La nova X du bulbe XTE J 1720-318

Une des premières sources X à trou noir observée par INTEGRAL a été la nova X XTE J1720-318 qui est entrée en éruption en janvier 2003. A cause du programme d'étalonnage en cours nous avons pu pointer INTEGRAL seulement un mois après le début de l'événement. A ce moment la source était déjà relativement faible. Les observations ont été effectuées simultanément avec INTEGRAL et RXTE et, quelque jour auparavant, avec XMM-Newton. En analysant et en combinant les spectres de la source, nous avons pu déterminer qu'elle était dans un état haut mou (HSS) typique des binaire X à trou noir. Grâce au programme de surveillance INTEGRAL du bulbe galactique (dans le cadre du temps garanti de la mission) nous avons ensuite pu suivre l'évolution de la source entre mars et août. Ceci nous a permis de déceler (Goldoni et al. 2003) la transition de la source dans un état dur (LHS) à la mi-mars. Le travail d'analyse de l'ensemble des données a été effectué principalement par Marion Cadolle Bel, dans le cadre de sa thèse, et nous avons présenté les résultats dans le papier **INTEGRAL, XMM-Newton and Rossi-XTE Observations of the State Transition of the X-ray Transient and Black Hole Candidate XTE J1720-318**, par Cadolle Bel et al. , 2004 (publication n°. 6).

En Fig. 7 de la publication, le contraste significatif entre les deux états spectraux dans les deux périodes est bien mis en évidence par la comparaison des spectres combinés. En fin février le disque d'accrétion était bien visible dans les données, avec une température du rayon interne de ~ 0.7 keV, et l'émission à plus de 20 keV était très faible avec une pente spectrale d'indice ~ 2.8 . Au mi mars, alors que le flux de la source à basse énergie restait très faible (sur la base des données RXTE/ASM), le flux à haute énergie (> 20 keV) s'accroissait en quelques jours d'un facteur > 10 -20, le spectre devenant plus dur, avec un indice de ~ 1.9 .

En considérant l'absorption importante affectant le spectre XMM et l'extinction mesurée dans le spectre infrarouge, on a pu estimer la distance de la source à $\sim 8 - 10$ kpc, ce qui positionne la nova dans le bulbe galactique et lui assigne une forte luminosité ($\sim 3 \cdot 10^{37}$ ergs s⁻¹). La source transitoire doit donc être un système binaire compact. L'absence des signatures des étoiles à neutrons (périodicité, sursaut de type I), la transition caractéristique d'un typique état mou (HSS) vers un typique état dur (LHS), la présence d'émission radio observée pendant l'état dur, indiquent qu'il s'agit d'une nouvelle nova X avec un trou noir comme objet compact.

Une deuxième source transitoire X du bulbe est entrée en éruption en août 2005. Il s'agit de la source XTE J1818-245 et, grâce à notre programme de suivi des nouvelles transitoires du bulbe, nous avons pu effectuer une observation INTEGRAL couplée à des observations radio et IR. La source a été détectée dans un état dur mais avec un flux très faible et les données sont en cours d'analyse.

3.7.2 Cyg X-1 dans un état intermédiaire

Cyg X-1, le prototype de trou noir dans un système binaire serré, a été observé avec INTEGRAL dès la phase d'étalonnage des télescopes en décembre 2002, quelques semaines seulement après la mise en orbite du satellite. Nous avons trouvé la source dans son état typique, l'état dur (LHS) (Bazzano et al. 2003, Cadolle Bel 2003, Cadolle Bel et al. 2006). Ensuite, en juin 2003, la source est entrée dans un état différent (repéré par RXTE/ASM) et une observation d'opportunité a été déclenchée. Cyg X-1 a été aussi observée plusieurs autres fois pendant le programme de balayage du disque galactique.

Cadolle Bel et ses collaborateurs ont analysé à nouveau l'ensemble des données. Nous avons ainsi pu mesurer le spectre de Cyg X-1 entre 5 keV et 10 MeV avec l'ensemble des télescopes de haute énergie d'INTEGRAL et nous avons trouvé en effet un changement d'état significatif en juin 2003. La source montrait en effet un spectre (Fig. 3.11) plus mou que dans l'état LHS, avec la présence significative d'une composante du disque d'accrétion, une composante importante de réflexion, une température de plasma élevée et surtout une composante significative à très haute énergie, entre 400 et 1000 keV, bien détectée avec le spectromètre d'INTEGRAL (Cadolle Bel et al. 2006). Cette composante à haute énergie semble très similaire, mais plus forte, que la composante observée par Mc Connel 2002 avec CGRO dans l'état *soft* (HSS). Cette composante ne peut pas être interprétée

en termes d'un spectre de Comptonisation thermique, même en tenant compte des effets relativistes (Titarchuk 1994). Nous avons appliqué le model hybride (Coppi 1999) qui ajoute une composante en loi de puissance avec distribution en énergie non maxwellienne, aux électrons du plasma. Les paramètres que nous avons trouvés sont acceptables et pas trop différents de ceux déduit par Mc Connel et al. (2002). Par contre, la composante est très intense et observée pour la première fois dans le spectre de Cyg X-1 dans un état intermédiaire. Nous avons aussi décelée des corrélations intéressantes entre la variabilité à large bande et les variations des composantes spectrales (Malzac et al. 2006), corrélations associées aussi à la variabilité radio (15 GHz) de la source.

Ces résultats confirment l'importance du rôle d'une composante non thermique dans le spectre de haute énergie et de la liaison entre le jet compact (qui produit vraisemblablement l'émission radio synchrotron) et le plasma chaud qui génère l'émission de rayons X durs et gamma mous.

3.7.3 Autres sources du programme et autres trous noirs observés avec INTEGRAL

Nous avons aussi suivi avec INTEGRAL la source persistante et premier microquasar 1E 1740.7-2942 (Del Santo et al. 2005), la source même que nous avons vu, avec SIGMA, émettre une large bosse spectrale à 400 keV en 1990. Le le spectromètre SPI, le principal instrument pour l'exploration de la bande d'énergie autour de 511 keV, souffre, avec sa résolution angulaire de 2°, de confusion dans cette région très encombrée. Il n'a donc pas pu mettre en lumière une possible composante variable à haute énergie dans l'émission de 1E 1740.7-2942.

J'ai aussi participé au travail sur deux autres novae X déjà connues et qui ont chacune montré des éruptions intenses (on appelle ces sources des transitoires récurrentes) observée avec INTEGRAL. Il s'agit de la source transitoire H 1743-322 de la région du bulbe galactique (Capitanio et al. 2005), qui a montré en 2003 une transition spectrale très intéressante, et de la nova X 4U 1630-47, connue pour ses éruptions quasi périodiques (~ 600 jours). Nous avons pu observer cette dernière entre 2002 et 2004 avec RXTE et INTEGRAL pendant ses éruptions les plus intenses et prolongées jamais observées (Tomsick et al. 2005). INTEGRAL, avec son télescope imageur IBIS/ISGRI, a permis notamment de tenir compte des périodes pendant lesquelles la source proche, IGR J16320-4751, contaminait les données RXTE. Une étude détaillée des données RXTE nous a mené à caractériser l'activité de 4U 1630-47 et à la comparer à celle montrée en 1998. Bien que la source ait présenté tout l'éventail d'états spectraux, elle était en général plus molle qu'en 1998 et elle n'a pas montré d'émission radio, ce qui est compatible avec le concept d'une *ligne de jet* dans le

diagramme intensité - rapport de dureté (Fender et al. 2004) (chapitre 3.6). La source a émis des sursauts pendant les périodes où elle montrait des luminosités de disque maximales et des températures internes de disque très élevées. Il pourrait s'agir d'une transition d'un disque de type Shakura-Sunyaev vers un disque géométriquement plus épais, les *slim disks* décrits par Abramowicz et al. (1988), attendu quand la source se rapproche de la luminosité d'Eddington.

En ce qui concerne les novas X du halo, nous avons eu la chance de pouvoir en observer une récemment. En effet SWIFT a découvert en août 2005 la nouvelle source SWIFT J1753.5-0127, positionnée hors du bulbe galactique et suffisamment haut en latitude pour être probablement une nova X proche du halo. Nous avons cette fois exploité notre proposition acceptée d'observation d'opportunité pour les nouvelles transitoires à haute latitude galactique, dont le prototype est XTE J1118. Les observations se sont déroulées nominalement et nous avons détecté la source avec un très bon rapport signal sur bruit (Cadolle Bel 2005), en simultané avec des observations radio et infrarouge. Les données sont maintenant en phase d'analyse et une publication est déjà en préparation (Cadolle Bel et al. 2006, en préparation).

Un dernier mot pour mentionner les autres programmes INTEGRAL (ceux auxquels je ne participe pas) concernant les trous noirs galactiques dans les binaires X. Le principal est certainement celui sur GRS 1915-105, le premier microquasar avec jets superluminiques (Fuchs et al. 2003, Rodriguez et al. 2004, Hannikainen et al. 2005). Il faut rappeler ensuite les observations de trous noirs persistants ou presque persistants comme GRS 1758-258 (Pottschmidt et al. 2005) et GX 339-4 (Belloni et al. 2006) et celles d'une autre nova X récurrente, XTE 1550-564, observées avec INTEGRAL en 2003 dans une phase de faible activité (*failed state transition*) (Sturner & Shrader 2004, Arefiev et al. 2004).

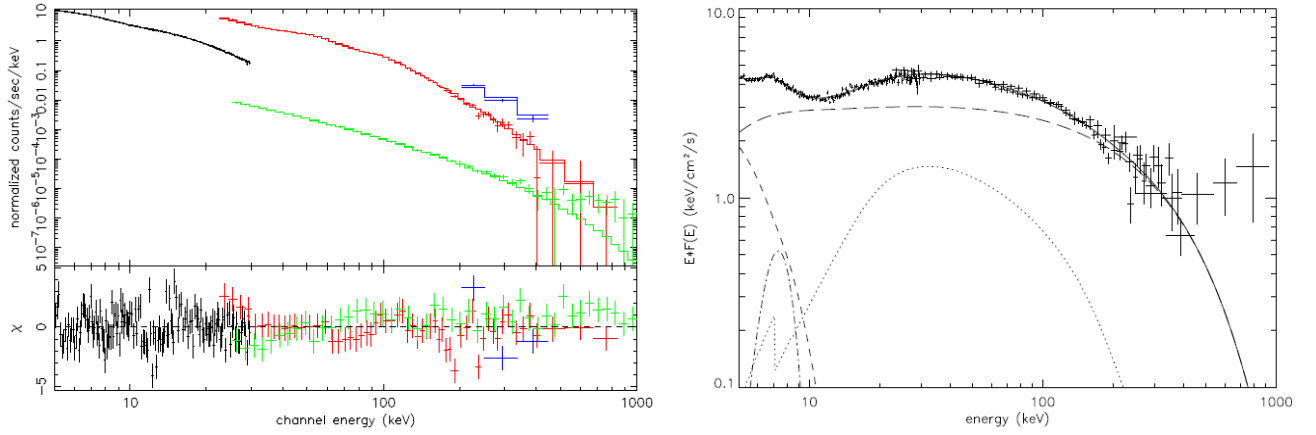


Fig. 3.11 Spectre INTEGRAL de Cyg X-1 et modèle spectral donnant le meilleur ajustement, pour les observations de juin 2003 quand la source était en état intermédiaire. *Gauche* : le spectre en coups (noir : JEM-X, rouge : IBIS/ISGRI, bleu : IBIS/PICSIT, vert : SPI). *Droite* : le spectre incident en photons en unités de $E \times F(E)$ et les différentes composantes du modèle spectral (petits tirets: disque, long tirets : Comptonisation, pointillé : réflexion, ligne continue : modèle total).

3.8 Conclusions

En guise de conclusion, je synthétise en Table 3.1 la contribution de SIGMA/GRANAT et INTEGRAL au thème de l'observation des trous noirs dans les systèmes binaires. Elle présente la listes des sources à trous noirs étudiées avec SIGMA et/ou INTEGRAL en signalant celles que j'ai étudiées directement (colonne de droite).

La liste comporte 19 entrées, ce qui est tout à fait honorable en regard des 35 sources à trous noirs répertoriées aujourd'hui (Mc Clintok & Remillard 2003), surtout si l'on tient compte que presque toutes sont des sources transitoires, donc non toujours observables par les deux missions, comme celles en éruption avant 1990 et entre 1997 et 2003. Ce résultat majeur de l'astrophysique des hautes énergies repose, bien sûr, sur le travail des équipes techniques qui ont contribué à la réalisation des ces deux télescopes à haute énergie, mais aussi sûr les ingénieurs et chercheurs qui ont réalisé les logiciels d'analyse des données et sûr les étudiants et chercheurs qui ont analyse et interprété les données.

Table 3.1 Systèmes binaires à trou noir observées avec SIGMA et/ou INTEGRAL

<i>Source</i>	<i>Type et Propriétés</i>	<i>Résultats SIGMA</i>	<i>Résultats INTEGRAL</i>	<i>Autres données</i>	<i>Références (code biblio.)</i>
<i>Cyg X-1</i>	P HM JC	Obs – QPO	Obs – HEE		A52,76,94,98
<i>1E 1740</i>	P LM J HEF	Dis – HEF RJ	Obs	XM	A12,19,20,86
<i>GRS 1758</i>	P LM J	Dis – RJ	Obs	RO AS XM	A32,38,49,57,64
<i>GX 339-4</i>	V LM JC/J	Obs	Obs		
<i>GRS 1915</i>	V LM J	Dis – RJ	Obs		A31,37
<i>4U 1630</i>	RXN		Obs	XTE	A89 C102
<i>H 1743</i>	RXN		Obs	XTE	A85 C92
<i>XTE J1550</i>	RXN J		Obs		
<i>Musca 91</i>	DXN 91 HEF	Dis – HEF			A14,15,26,27
<i>Persei 92</i>	DXN 92	Obs – QPO			A34,35,40,48
<i>Ophiuchi 93</i>	DXN 93	Dis			A50,54
<i>Velorum 93</i>	DXN 93	Dis		XTE	A53 C56
<i>SWIFT 1753</i>	DXN 05		Obs		T23
<i>GRS 1730-312</i>	BXN 94	Dis		XTE	A44,47
<i>GSR 1739-278</i>	BXN 96	Dis		XTE	A51 C45
<i>GRS 1737-31</i>	BXN 97	Dis		XTE	
<i>XTE J1755-32</i>	BXN 97	Obs		XTE	A55,59
<i>XTE J1720-31</i>	BXN 03		Obs	XTE XM	T15 A82 C97,101
<i>XTE J1818-24</i>	BXN 05		Obs		

Notes :

Ordre : par type, puis par chronologie d'observation.

Col 1 : désignation courant de la source (voir texte pour les noms et les coordonnées)

Col 2 : Type de source, P=persistante, V=hautement variable (mais pas tout à fait transitoire), XN = nova X, Recourants (RXN), du Disque galactique ou halo (DXN), du Bulbe galactique (BXN), HM / LM = binaire de haute ou faible masse, J = jet radio ou X, JC = jet radio compact, HEF = raie ou structure spectrale à haute énergie, HEE = composante en émission continue à haute énergie

Col 3 : détecté (Obs) par SIGMA ou découvert (Dis) par SIGMA (ou GRANAT) et résultats principaux : RJ = conduit à la découverte de jets radio, QPO = détection d'oscillations quasi périodiques

Col 4 : de même pour INTEGRAL

Col 5 : contribution avec des données d'autres observatoires : AS=ASCA, RO=ROSAT, XM = XMM-Newton, XT = Rossi-XTE

Col 6 : références principales de mes travaux sur la source (code de la bibliographie)

Bibliographie

- Abramowicz, M., et al., 1988, ApJ, 332, 646
Arefiev, V.A., et al., 2004, AstL, 30, 669
Belloni, T., et al., 2006, MNRAS, in press, astro-ph/0601031
Bouchet, L., et al., 1992, ApJ, 383, L45 [A12]
Cadolle Bel, M., 2003, rapport de stage du DEA d'Astrophysique, Ecole Doctorale Ile de France.
Cadolle Bel, M., et al., 2004, A&A, 426, 659 [A82] (**Publication n° 6**)
Cadolle Bel, M., et al., 2005, Atel N. 574 [T23]
Cadolle Bel, M., et al., 2006, A&A, 446, 591 [A94]
Capitanio, F., et al., ApJ, 622, 503 [A85]
Cheng, L.X., et al., 1998, ApJ, 503, 809
Chakrabarti, S. & Titarchuk, L., 1995, ApJ, 455, 623
Coppi, P., 1999, ASP Conf. Ser., 161, 275
Corbel, S., et al., 2002, Sci., 298, 196
Cordier, B., et al., 1993, A&A, 272, 277 [A19]
Cordier, B., et al., 1993b, A&A, 275, L1 [A20]
Denis, M., et al., 1994, ApJSS, 92, 459 [A34]
Del Santo, M., et al. 2005, A&A, 433, 613 [A86]
Esin, A., et al., 1998, ApJ, 505, 854
Falcke, H., et al., 2004, A&A, 414, 895
Fender, R.P., 2001, MNRAS, 322, 31
Fender, R.P., et al., 2004, MNRAS, 355, 1105
Finogenov, A.V., et al., 1993, AstL, 19, 435 [A31]
Finogenov, A.V., et al., 1994, ApJ, 424, 940 [A37]
Finogenov, A.V., et al., 1996, AstL, 22, 721 [A48]
Fuchs, Y., et al., 2003, A&A 409, L35
Giacconi, R., et al., 1963, Phys. Rev. Lett., 9, 439
Giacconi, R., et al., 1971, ApJ, 167, L67
Gierlinski, M., et al., 1997, MNRAS, 288, 958
Gierlinski, M., et al., 1999, MNRAS, 309, 496
Gilfanov, M., et al., 1993, ApJ, 418, 844 [A32]
Gilfanov, M., et al., 1993b, A&ASS, 97, 303 [A27]
Gilfanov, M., et al., 1999, A&A, 352, 182
Goldoni, P., et al., 1998, A&A, 329, 186 [A53]
Goldoni, P., et al., 1999, ApJ, 511, 847 [A55]
Goldoni, P., et al., 2002, Conf. Proc. of the Symp. "The Multi Color Universe", 96 [C74]
Goldoni, P., et al., 2003, Atel N. 153 [T15]
Goldwurm, A., et al., 1992, ApJ, 389, L79 [A14] (**Publication n° 4**)
Goldwurm, A., et al., 1993, A&ASS, 97, 293 [A26]
Goldwurm, A., et al., 1996, A&A, 310, 857 [A43]
Goldwurm, A., et al., 1997, Proc. of XXV I.C.R.C. Symposium, V. 3, OG 3.1.1, p. 81 [C50]
Goldwurm, A., et al., 2001, Proc. of Gamma-1 Symposium, AIP, 587, 61 [C73]
Goldwurm, A., et al., 2002, Proc. of the Workshop "XMM-Newton", ESA - ESP 488 [C77]
Grebenev, S., et al., A&ASS, 97, 281
Greiner, J., et al., 2001, Nature, 414, 522
Grove, E., et al., 1998, ApJ, 500, 899
Guessoum, N. & Kazanas, D., 1999, ApJ, 512, 332
Hannikainen, D. C., et al., 2005, A&A 435, 995

Hameury, J.-M., et al., 1994, A&A, 287, 802
 Homan, J., et al., 2001, ApJS, 132, 377
 Hua, X. & Lingenfelter, R.E., 1993, ApJ, 416, L17
 Kaiser, C.R. & Hannikainen, D., 2002, MNRAS, 330, 225
 Kuznetsov, S., et al., 1997, MNRAS, 292, 651 [A52]
 Kuznetsov, S., et al., 1999, Ast.Lett., 25, 351 [A57]
 Laurent, P. & Titarchuk, L., 1999, ApJ, 511, 289
 Liang, E.P., et al., 1998, Phy. Rep. 302, 67
 Ling, J., et al., 1987, ApJ, 321, L117
 Malzac, J., et al., 2002, MNRAS, 326, 417
 Malzac, J., et al., 2006, A&A, 448, 1125 [A98]
 Martin, E.L., et al., 1996, New Astr., 1, 197
 Mendez, M., et al., 1999, ApJ, 499, 187
 Mc Clintock, J.E., & Remillard, R.A., 2003, in *Compact Stellar X-Ray Sources*, eds. W.H.G. Lewin and M. van der Klis, Cambridge University Press
 Mc Connell, M.L., 2002, ApJ, 572, 984
 Miller, J.M., et al., 2002, SpJ, 566, 358
 Miller, J.M., 2004, Apj, 606, 131
 Mirabel, I.F. & Rodriguez L.F., 1999, ARAA 37, 409
 Orosz, J.A., et al., 1996, ApJ. 468, 380
 Pottschmidt, K., et al., 2005, A&A submitted, astro-ph/0509006
 Poutanen, J., 2001, AdSpR, 28, 267
 Pringle, J.E., 1976, MNRAS, 177, 65
 Revnivtsev, M., et al., 1998, A&A, 331, 557 [A54]
 Revnivtsev, M., et al., 1999, AstL, 25, 493 [A59]
 Revnivtsev, M., et al., 2004, AstL, 30, 527 [A81]
 Roques, J.-P., et al., 1994, ApJS, 92, 451 [A35]
 Schreier, E., et al., 1972, ApJ, 172, 79
 Shakura, N.I. & Sunyaev, R.A., 1973, A&A 24, 337
 Shapiro, S.L., et al., 1976, ApJ, 204, 187
 Smith, D., et al., 2001, ApJ, 554, L41
 Strohmayer, T., 2001, ApJ, 554, 169
 Sturmer, S.J. & Shrader, C. R., ApJ, 625, 923
 Sunyaev, R.A. & Titarchuk L., 1980, A&A 86, 121
 Sunyaev, R.A., et al. 1992, ApJ, 389, L75 [A15]
 Tanaka, Y. & Shibazaki, N., 1996, ARAA, 34, 607
 Titarchuk, L., 1994, ApJ, 429, 340
 Tomsik, J.A., et al., 2005, ApJ, 630, 413 [A89]
 Trudolyubov, S.P., 1996, AstL, 22, 664 [A47]
 Trudolyubov, S.P., 1999, A&A, 342, 496
 Van der Klis, M., 1995, *X-Ray Binaries*, eds. W.H.G. Lewin, CAS 62, 252.
 Vargas, M., et al., 1996, A&A, 313, 828 [A44]
 Vargas, M., et al., 1996, A&ASS, 120, 291 [A46]
 Vargas, M., et al., 1997, A&A, 476, L23 [A51] (**Publication n° 5**)
 Vargas, M., et al., 1997, Proc. 2nd INTEGRAL Workshop, ESA-SP382, 129 [C45]
 Vikhlinin, A., et al., 1995, 441, 779 [A40]
 Yi, I. & Narayan, R., 1997, ApJ, 486, 363
 Zdziarski, A.A., 2000, IAU Symp. 195, 153
 Zdziarskii, A.A. & Gierlinski, M., 2004, Prog. Theo. Phys. Supp., 155, 99

Publications présentées

Systèmes binaires X à trou noir dans la Galaxie (VIII – 3)

- 4 **SIGMA/GRANAT Soft Gamma-Ray Observations of the X-Ray Nova in Musca: Discovery of Positron Annihilation Emission Line**
A. Goldwurm, J. Ballet, B. Cordier, J. Paul, L. Bouchet, J.P. Roques, D. Barret, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Dyachkov, N. Khavenson, V. Kovtunenkov, R. Kremnev, K. Sukhanov,
1992, *The Astrophysical Journal (Letters)*, V. 389, p. L79. (n°. citations : 105).
- 5 **SIGMA/GRANAT Discovery of GRS 1739-278, a Hard X-Ray Transient in the Galactic Bulge**
M. Vargas, A. Goldwurm, P. Laurent, J. Paul, E. Jourdain, J.-P. Roques, V. Borrel, L. Bouchet, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, B. Novikov, A. Dyachkov, N. Khavenson, K. Sukhanov & N. Kuleshova,
1997, *The Astrophysical Journal*, V. 476, p. L23
- 6 **INTEGRAL, XMM-Newton and Rossi-XTE Observations of the State Transition of the X-ray Transient and Black Hole Candidate XTE J1720-318**
Cadolle Bel, M.; Rodriguez, J.; Sizun, P.; Farinelli, R.; Del Santo, M.; Goldwurm, A., Goldoni, P.; Corbel, S.; P.; Parmar, A. N.; Kuulkers, E.; del Santo, M.; Ubertini, P.; Frontera, F., Amati, L.; Roques, J.-P.; Westergard, J.
2004, *Astronomy & Astrophysics*, 426, 659

SIGMA/GRANAT SOFT GAMMA-RAY OBSERVATIONS OF THE X-RAY NOVA IN MUSCA: DISCOVERY OF POSITRON ANNIHILATION EMISSION LINE

A. GOLDWURM, J. BALLEST, B. CORDIER, AND J. PAUL

Service d'Astrophysique, Centre d'Etudes de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

L. BOUCHET, J. P. ROQUES, D. BARRET, AND P. MANDROU

Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, 9 avenue du Colonel Roche, BP 4346, 31029 Toulouse Cedex, France

R. SUNYAEV, E. CHURAZOV, M. GILFANOV, A. DYACHKOV, AND N. KHAVENSON

Space Research Institute, Profsoyuznaya, 84/32, Moscow 117296, Russia

AND

V. KOVTUNENKO, R. KREMNEV, AND K. SUKHANOV

Lavochkin Association, Khimki, Moscow District, Russia

Received 1991 November 20; accepted 1992 February 6

ABSTRACT

The day after its discovery by the Watch instrument, the X-ray nova GRS 1124–684 in Musca was detected by the soft γ -ray telescope SIGMA at the limit of its field of view. SIGMA pointed the source seven other times between 1991 January and February, and GRS 1124–684 has always been detected up to 300 keV, showing it was one of the hardest objects of the sky. After the flare of January 9 the average spectrum is well fitted by a power law of index 2.38, and the light curve shows a slower decrease than observed at low energy with superposed variability on time scales of several hours. However, the most remarkable result is the discovery of an emission feature around 500 keV in the source spectrum during one postflare observation. The line was detected in the images at a level of 5.1σ ; it had a width compatible with the detector spectral resolution and a flux of 6.0×10^{-3} photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. This is first clear evidence of γ -ray line emission from soft X-ray transients, and, if interpreted as a positron annihilation line, it strongly suggests the X-ray nova in Musca to be a new black hole candidate.

Subject headings: binaries: close — gamma rays: observations — X-rays: general

1. INTRODUCTION

A new soft X-ray transient has been discovered in Musca by the Watch detector aboard the GRANAT satellite and by the Ginga ASM instrument (IAU Circ., No. 5161). Watch detected the new source (called GRS 1124–684) on 1991 January 8 at a level of 0.7 Crab in the 6–15 keV band, then at 1.5 Crab on the 10th and again at 2 Crab on the 13th, while it was below the Watch detection sensitivity on January 5 (Brandt 1991). Ginga detected the source on January 8 but recorded the maximum a few days later. The X-ray peak at low energies (< 15 keV) was therefore attained by the source between January 12 and 16 and was followed by a smooth exponential decay with $\tau \approx 30$ days (Tanaka et al. 1991). ESO optical observations carried out at La Silla (Chile) led to the discovery of the optical counterpart which showed an increase of 8–9 V at R.A.(1950) = $11^{\text{h}}24^{\text{m}}18^{\text{s}}.49$, decl.(1950) = $-68^{\circ}24'0''.17$ (IAU Circ., No. 5165; Della Valle 1991).

On January 9 the γ -ray telescope SIGMA on board GRANAT detected Nova Muscae at the very edge of its field of view (FOV). Follow-up observations took place during the same month and again in February. Results obtained from the whole set of the SIGMA imaging observations of Nova Muscae (Table 1), including three later ones carried out in April, May, and August, are presented here and in a companion Letter (Sunyaev et al. 1992).

2. IMAGE ANALYSIS AND TIME VARIABILITY

The French coded aperture telescope SIGMA provides high-resolution ($\approx 15'$) images of the sky in the 35–1300 keV

band (see Paul et al. 1991). An observation lasts ≈ 1 day and is divided into five or six subsessions during which four fine resolution images in wide energy bands (40–70, 70–150, 150–280, 280–620 keV) are recorded along with three sets of 95 images of coarser resolution in 95 channels between 35 and 1300 keV. After corrections to remove spurious nonuniform structures, sky images are reconstructed by standard decoding procedures (e.g., Fenimore & Cannon 1981).

Figure 1 shows the sum of the SIGMA fine images of the last three January observations of GRS 1124–684 in the 40–150 keV band. The source is detected at a level of 55σ . The peak shape is fully compatible with the SIGMA point-spread function (PSF) at the best-fit position of R.A.(1950) = $11^{\text{h}}24^{\text{m}}08^{\text{s}}$, decl.(1950) = $-68^{\circ}23'06''$ with a square error box of $3/3$ size (statistical errors at 90% confidence level in four parameters plus incertitude on the satellite attitude), compatible with the optical position.

Figure 2 shows the source light curve in three bands during winter. The flux (40–150 keV) dropped rapidly from 0.97 Crab¹ at the beginning of January 9 to 0.36 Crab 6 days later. Since then, the decay slowed down and the 40–150 keV intensity decreased to only 0.22 Crab in 24 days, but with strong (up to 60%) and irregular superposed variability on time scales of several hours. In April the source was not detected (3σ upper limit of 0.08 Crab in 40–150 keV), while in May and August

¹ One Crab is the intensity detected by a given detector in a given energy band from the Crab Nebula. For SIGMA 1 Crab in the 40–150 keV band corresponds to $4.74 \text{ counts s}^{-1}$, i.e., $1.15 \times 10^{-8} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

TABLE 1
SIGMA OBSERVATIONS AND POWER-LAW SPECTRAL PARAMETERS
OF NOVA MUSCAE

Observation Date (1991)	Exposure Time (s)	Photon Spectral Index	Energy Flux (40–300 keV) (10^{-9} ergs cm^{-2} s^{-1})	χ^2 d.o.f. $\nu = 23$
Jan 9	61,131	2.73 ± 0.12	14.46 ± 0.75	1.22
Jan 16	72,651	2.30 ± 0.09	5.46 ± 0.22	1.56
Jan 17	61,211	2.35 ± 0.11	4.56 ± 0.23	0.99
Jan 20	73,631	2.30 ± 0.09	5.21 ± 0.22	1.76
Feb 1	64,387	2.31 ± 0.14	3.25 ± 0.24	1.65
Feb 3	66,164	2.53 ± 0.11	4.20 ± 0.22	0.92
Feb 5	77,175	2.53 ± 0.11	3.73 ± 0.20	1.50
Feb 10	70,427	2.35 ± 0.14	3.14 ± 0.22	1.48
Apr 12	22,655	Not detected		
May 31	63,232	2.61 ± 0.78	0.92 ± 0.30	1.04 ^a
Aug 15	47,148	2.01 ± 0.44	1.29 ± 0.23	0.87 ^a

^a Number of degrees of freedom $\nu = 13$.

(more than 100 days after the flare) positive signals at 6 and 6.5 σ in the first band and at 3 and 4.6 σ in the second were, respectively, detected (0.08 and 0.1 Crab in 40–150 keV, respectively).

3. SPECTRAL ANALYSIS

After correction and deconvolution of the 95 spectral images of each observation, the count rate at the source position is estimated and the resulting pulse-height spectrum is compared to models of incident spectra modified by the detector response matrix (Barret & Laurent 1991). In all winter observations, the nova was detected up to 300 keV with a spectrum generally well fitted by a power-law model. The best-fit parameters (photon index and integrated energy flux) are given in Table 1 (errors are at confidence level of 70% in two parameters). A clear hardening of the source is observed after the flare (see also Fig. 3). Then the power-law slope remained comprised between 2.3 and 2.6, with a possible harder slope during August. The averaged spectrum of all the afterflare winter observations is well fitted by a power law with an index of 2.38 ± 0.05 and an integrated energy flux in 40–300 keV of $(4.15 \pm 0.08) \times 10^{-9}$

ergs cm^{-2} s^{-1} ($\chi^2_\nu = 1.47$ for $\nu = 43$ d.o.f.). Different spectral shapes can also fit the data. For an unsaturated Comptonization model with disk geometry (Sunyaev & Titarchuk 1980) we obtained the best fit for a temperature of $kT_e = 74 + 48/-16$ keV and half-disk optical thickness of $\tau = 0.37 \pm 0.19$ ($\chi^2_\nu = 1.35$ for $\nu = 42$ d.o.f.).

4. DISCOVERY OF AN EMISSION FEATURE AROUND 500 keV

A feature around 500 keV is present in the spectrum of the last 13 hr of the January 20 observation. Figure 4 shows two images of part of the SIGMA FOV around the nova in the 430–530 keV band, for the first 7.1 hr of data of the observation (left) and for the last 13 hr (right). The images have been obtained by first deconvolving by delta decoding (Fenimore & Cannon 1981) and then convolving with the corresponding PSF in order to optimize the signal-to-noise ratio. A 5.1 σ excess is located close ($\approx 3'$) to the position of GRS 1124–684

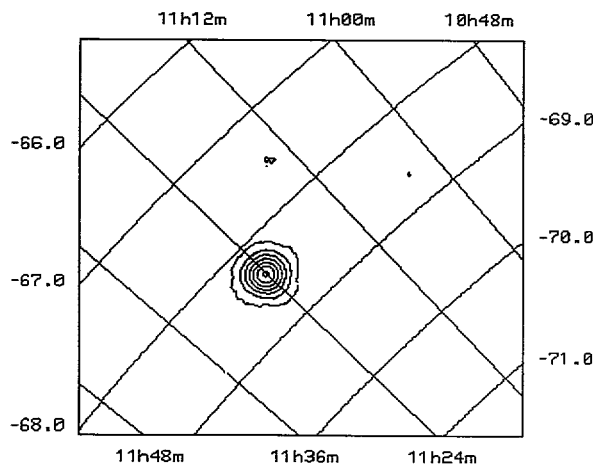


FIG. 1.—Contour plot image of the sum of the fully coded FOV of the observations performed on 1991 January 16, 17, and 20 in the range 40–150 keV. The contour levels are in units of standard deviations (σ) over the background mean, starting from 4 σ and spaced by 6.5 σ . GRS 1124–684 is here detected at 55 σ .

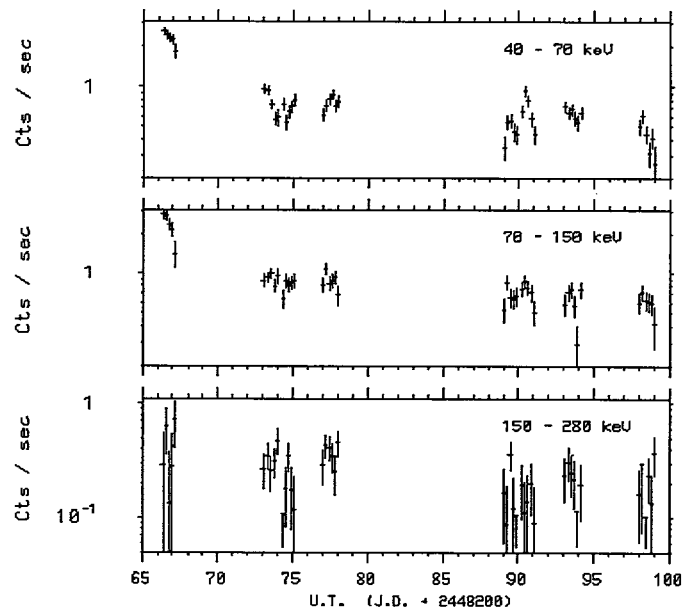


FIG. 2.—Light curve of GRS 1124–684: the detected count rate in the three fine image energy bands for the different subsessions of each winter observation is plotted vs. the universal time (U.T.).

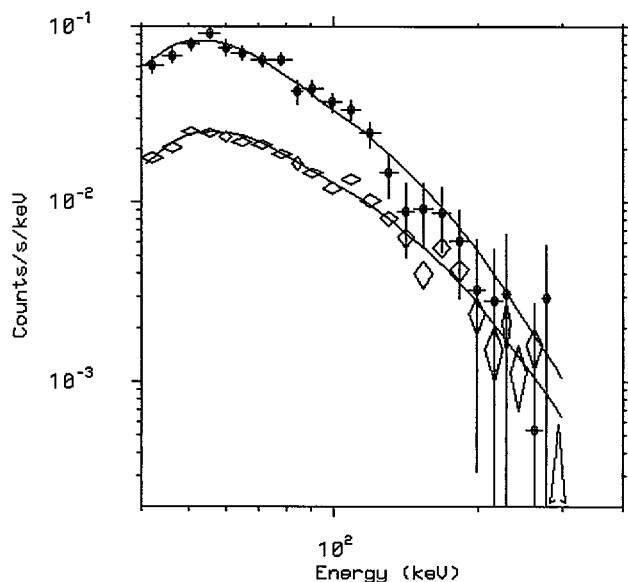


FIG. 3.—Count spectrum of GRS 1124–684 during the flare of January 9 (circles) and after the flare (averaged spectrum of January 16, 17, and 20 data) (diamonds). The continuum lines are the best-fit power-law models.

in the second part of the observation while no excess ($< 1.5 \sigma$) is present in the first part. Figure 5 shows the source spectrum of the last 13 hr of the observation where can be noted the significant excess around 500 keV and the absence of emission between 350 and 430 keV as well as after 550 keV. The 40–1000 keV count spectrum has been fitted with a model of a power-law plus a Gaussian function. The best fit ($\chi^2_\nu = 1.25$ for 35 d.o.f.), the solid line in Figure 5, was obtained for a power-law index of 2.42 with an integrated flux of 6.76×10^{-9} ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$, a line flux of $(6.01 + 2.95/-2.76) \times 10^{-3}$ photons cm $^{-2}$ s $^{-1}$ at a centroid of 481 ± 22 keV, and an intrinsic line width (σ) of 23 ± 23 keV (errors are at 68% confidence level in the three line parameters with power law fixed at the best fit). The observed line width could be compatible with the instrumental spectral resolution (9.1% FWHM at the 513 keV; Mandrou et al. 1991). The best fit of a power law alone to the same data gave $\chi^2_\nu = 1.62$ for 38 d.o.f. for an index of 2.36 ± 0.11 and a flux of $(7.15 \pm 0.60) \times 10^{-9}$ ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$. Therefore the emission feature is significant at a confidence level $> 99.95\%$.

Including, as the third component in the model, the ortho-positronium (ortho-Ps) spectrum we obtained a best-fit line flux of $(5.50 + 1.9/-3.7) \times 10^{-3}$ photons cm $^{-2}$ s $^{-1}$ at about the same energy centroid, and an integrated ortho-Ps flux upper limit of 5.1×10^{-3} photons cm $^{-2}$ s $^{-1}$ at 68% confidence level in four parameters (power law fixed at the best fit), that is more than a factor of 4.8 less than the expected flux when all pairs annihilate through Ps formation. Another feature seems to be present in the spectrum around 200 keV, suggestively close to the 511 keV backscattering energy (≈ 170 keV). Its flux is $\approx 1.8 \times 10^{-3}$ photons cm $^{-2}$ s $^{-1}$ and cannot be attributed to the 511 keV backscattered photons in the instrument, indicating the possible presence of a 511 keV reflection feature in the incident source spectrum (Lingenfelter & Hua 1991). The 500 keV feature was not detected in other observations. For a line width of 20 keV, we obtained a 3σ upper limit of 3.2×10^{-3} photons cm $^{-2}$ s $^{-1}$ on February 1.

5. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The Nova Muscae progenitor was probably a faint K5–M0 late-type star at a distance of < 3 kpc (Della Valle et al. 1991; Gonzales & Shrader 1991). At 1 kpc the X-ray luminosity in the 40–300 keV is $(1.73 \pm 0.09) \times 10^{36}$ ergs s $^{-1}$ at the peak and $(6.53 \pm 0.26) \times 10^{35}$ ergs s $^{-1}$ after the flare. The 3–300 keV luminosity is at least 10 times higher because the power law extends down to ≈ 3 keV with similar slope or steeper (Sunyaev et al. 1992). Therefore GRS 1124–684 must be a low-mass close binary system whose accreting object is a neutron star or a black hole (BH). The slow decay of the X-ray light curve and all other observed properties identify this source with a soft X-ray transient (SXRT) (White et al. 1984). A distinct subclass of SXRT has been recognized to have properties similar to those of the BH candidate Cyg X-1 (White et al. 1984; Tanaka 1989). One of their distinct features is a single power-law X-ray spectrum with a hard tail extending up to ≥ 200 keV. The prototype A0620–00 is now considered one of the best BH candidates (McClintock & Remillard 1986).

Our results show that also Nova Muscae has a strong hard power-law component which extends up to 300 keV with a relatively constant slope similar to other A0620–00-like SXRTs. Moreover its < 15 keV light curve is strikingly similar to those of A0620–00 and GS 2000–25 (Tanaka et al. 1991),

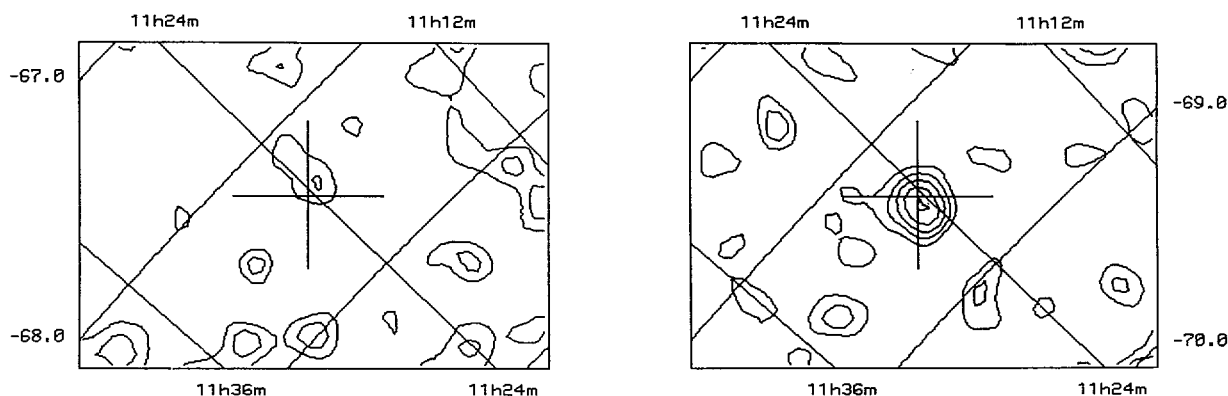


FIG. 4.—Contour plot images of part of the FOV for the observation performed on January 20 in the range 430–530 keV. The contour levels are in units of statistical standard deviations (σ) over the background mean starting from 1σ and separated by 1σ . The GRS 1124–684 optical position is indicated by a cross. Left: first 7.1 hr of the observation. Right: last 13.3 hr of the observation.

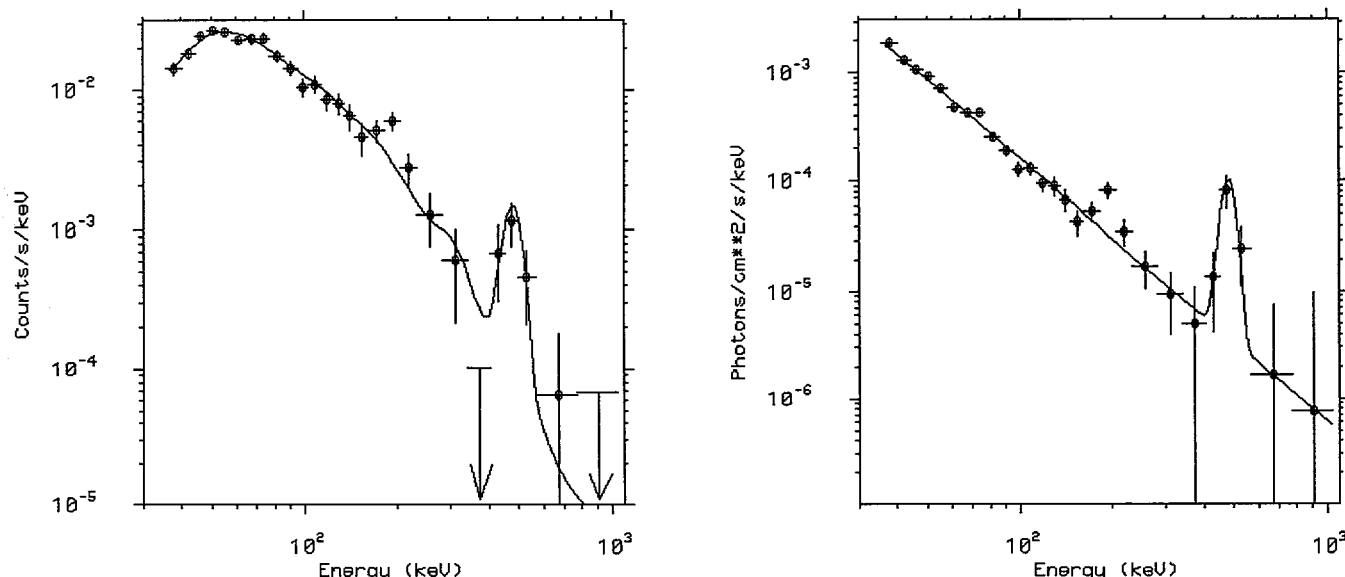


FIG. 5.—Spectrum of GRS 1124–684 for the last 13.3 hr of the January 20 observation: count spectrum (left) and photon spectrum (right). The solid line is the best-fit model of a power-law plus a Gaussian line.

although at high energy (>40 keV) we observed a much slower and irregular decay.

If the observed emission line at 480 keV is interpreted as a positron annihilation line, the BH hypothesis is further supported. Nucleosynthesis origin is unlikely since the feature suddenly rose up 10 days after the flare and because of the lack of evidence of such processes in SXRT. Both thermal (Liang & Dermer 1988) and nonthermal (Aharonian & Vardanian 1985) models predict important production of pairs in the hot plasma of the innermost region of a BH accretion disk, the same hot plasma which could produce the hard power-law tail through unsaturated Comptonization of soft photons (Shapiro et al. 1976). In thermal models episodic heating of this plasma to $T > 10^9$ K (suppressed in neutron star systems by the Compton cooling due to the intense soft radiation emitted by the hot surface) gives rise to the production of positrons via photon-photon interactions and their annihilation in a colder medium would then produce a narrow 511 keV line. This model was proposed to explain the ≈ 1 MeV bump (Liang & Dermer 1988) and the weak detection of the 511 keV line in Cyg X-1 during its γ_1 state (Ling & Wheaton 1989; Ling 1991). In the case of Nova Muscae, however, the ratio L_{511} to >500 keV continuum is certainly higher than expected from this

model and observed in Cyg X-1 (Ling & Wheaton 1989). In fact the line was very intense with a flux of 6×10^{-3} photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (i.e., at 1 kpc a luminosity of $L_{511} \approx 5.8 \times 10^{35}$ ergs s^{-1}), variable (rise time < 7 hr and decay within 10 days), not too broad (1σ line width upper limit ≈ 107 keV) with no sign of ortho-Ps emission. The line width limit constrains the temperature of the annihilation region to be $T < 10^8$ K while the lack of ortho-Ps indicates that either $T > 8 \times 10^5$ K, so that annihilation occurs mainly without formation of Ps, or the density is $> 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ so that the ortho-Ps is dissociated by collisions (Crannell et al. 1976). The line variability sets an upper limit of only 7×10^{14} cm to the size of the emitting region. We also measured a redshift of the line centroid of $\approx 6\%$ – 7% from 511 keV, although, due to the large errors, its statistical significance is not very high.

In conclusion, Nova Muscae strongly resembles to the A0620–00-like SXRTs thought to contain a BH. The BH hypothesis is further supported by the SIGMA detection of a variable emission line at ≈ 500 keV which suggests that physical conditions in GRS 1124–684 are similar to those of the black hole candidates Cyg X-1 and 1E 1740.7–2942, for which episodic excesses at ≈ 500 keV have also been detected (Ling et al. 1987; Bouchet et al. 1991; Sunyaev et al. 1991; Ling 1991).

REFERENCES

- Aharonian, F. A., & Vardanian, V. V. 1985, *Space Sci. Rev.*, 115, 31
 Barret, D., & Laurent, P. 1991, *Nucl. Instr. Meth.*, A307, 512
 Bouchet, L., et al. 1991, *ApJ*, 383, L45
 Brandt, S. 1991, in *Proc. Workshop on Nova Muscae*, Lyngby, in press
 Crannell, C. J., et al. 1976, *ApJ*, 210, 582
 Della Valle, M., et al. 1991, *Nature*, 353, 50
 Gonzales, R., & Shrader, C. 1991, in *Proc. Workshop on Nova Muscae*, Lyngby, in press
 Fenimore, E. E., & Cannon, T. M. 1981, *ApJ*, 20 (10), 1858
 Liang, E. P., & Dermer, C. D. 1988, *ApJ*, 265, 389
 Ling, J. C. 1991, in *Gamma-Ray Line Astrophysics* (AIP Conf. Proc. 232), ed. P. Durouchoux & N. Prantzos (New York: AIP), 407
 Ling, J. C., & Wheaton, W. A. 1989, *ApJ*, 343, L57
 Ling, J. C., et al. 1987, *ApJ*, 321, L117
 Lingenfelter, R. E., & Hua, X. 1991, *ApJ*, 381, 426
 Mandrou, P., et al. 1991, in *Gamma-Ray Line Astrophysics* (AIP Conf. Proc. 232), ed. P. Durouchoux & N. Prantzos (New York: AIP), 492
 McClintok, J. E., & Remillard, R. A. 1986, *ApJ*, 308, 110
 Paul, J., et al. 1991, *Adv. Space Res.*, 11 (8), 289
 Shapiro, S., et al. 1976, *ApJ*, 204, 187
 Sunyaev, R., & Titarchuk, L. G. 1980, *A&A*, 86, 121
 Sunyaev, R., et al. 1991, *ApJ*, 383, L49
 Sunyaev, R., et al. 1992, *ApJ*, 000, L00
 Tanaka, Y. 1989, in *Proc. 23rd ESLAB Symp.* (ESA SP-296), ed. J. Hunt & B. Battrick (Noordwijk: ESA), 1, 3
 Tanaka, Y., et al. 1991, Poster Paper at Workshop on Nova Muscae, Lyngby
 White, N. E., et al. 1984, in *High Energy Transients in Astrophysics*, ed. S. E. Woosley (AIP Conf. Proc. 151) (New York: AIP), 31

SIGMA/GRANAT DISCOVERY OF GRS 1739–278, A HARD X-RAY TRANSIENT IN THE GALACTIC BULGE

M. VARGAS, A. GOLDWURM, P. LAURENT, AND J. PAUL

CEA/DSM/DAPNIA/Service d’Astrophysique, CEA-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

E. JOURDAIN, J.-P. ROQUES, V. BORREL, AND L. BOUCHET

Centre d’Etude Spatiale des Rayonnements, 9 Avenue du Colonel Roche, BP 4346, 31029 Toulouse Cedex, France
 AND

R. SUNYAEV, E. CHURAZOV, M. GILFANOV, B. NOVIKOV, A. DYACHKOV, N. KHAVENSON, K. SUKHANOV, AND N. KULESHOVA

Space Research Institute, Profsoyuznaya 84/32, Moscow 117810, Russia

Received 1996 August 27; accepted 1996 November 25

ABSTRACT

While the SIGMA telescope performed its twelfth observing campaign on the Galactic center region, a new hard X-ray transient source was discovered. The source, named GRS 1739–278, was bright during the whole campaign with a hard spectrum. Thanks to the accurate position provided by the coded-mask imaging technique, the GRS 1739–278 counterparts at other wavelengths have been promptly identified. The collected observations and similarities of the source behaviors with those of Nova Muscae 1991 suggest that GRS 1739–278 may contain a black hole located in the Galactic bulge. The fact that the hard X-ray peak luminosity of GRS 1739–278 is similar to that of GRS 1730–312 (another hard X-ray transient observed by SIGMA in the bulge) leads us to consider the hard X-ray transient peak luminosity as a possible distance indicator.

Subject headings: binaries: close — black hole physics — gamma rays: observations

1. INTRODUCTION

The French coded-mask telescope SIGMA provides high-resolution images in the hard X-ray/soft γ -ray band from 30 to 1300 keV, with a typical angular resolution of $15'$ and a 20 hr exposure sensitivity (2σ) of ≈ 26 mcrab, in a total field of view of $18^\circ \times 17^\circ$ (Paul et al. 1991). Mounted on board the Russian *Granat* space observatory, SIGMA has observed the $18^\circ \times 17^\circ$ region of the Milky Way around the Galactic center (GC) in the spring and fall of each year from 1990 to 1994 as well as in 1995 September. A total of 15 sources have been detected during this survey, of which one is identified with a binary X-ray pulsar, five others are associated with bursting low-mass X-ray binary systems powered by an accreting neutron star, and three are considered black hole (BH) candidates (Goldwurm et al. 1994; Churazov et al. 1994; Vargas et al. 1996a). On 1996 March 15 the SIGMA telescope started a new campaign of GC observations, which lasted until the end of the month. Three known sources, 1E 1740.7–2942, GRS 1758–258, and GX 1+4, showed activity, while two other new sources have been detected. The first one is the unique bursting accreting binary pulsar GRO J1744–28 (Bouchet et al. 1996; Vargas et al. 1996a) discovered by BATSE on 1995 December 2 (Fishman et al. 1995). The second one, GRS 1739–278 (Paul et al. 1996; Vargas et al. 1996a), is a newly discovered X-ray transient source. We report here on the discovery of GRS 1739–278 in the data collected by SIGMA during the 1996 March campaign.

2. OBSERVATIONS, DATA ANALYSIS AND RESULTS

The GC was observed by SIGMA during the spring of 1996 from March 15 to March 30. The campaign consisted of eight distinct observation sessions, performed in the spectral-imaging mode (Paul et al. 1991), for a total effective time of 154 hr. Table 1 presents their start and end times and the corresponding total dead-time–corrected exposure. After corrections and deconvolution (see Goldwurm 1995), the data recorded during

each observation session have been used to build series of images in several energy bands. During each observation session, a new source, GRS 1739–278 (Paul et al. 1996), was detected at the border of the totally coded field of view. Figure 1 shows the summed image derived in the 40–150 keV energy band where GRS 1739–278 appears at a confidence level of 9.5σ .

In order to estimate the most probable position of the source, we have selected data in the 60–120 keV interval, i.e., the best compromise between source count statistics—higher in the low-energy regime of the SIGMA domain—and size of the instrument point-spread function (PSF)—narrower in the high-energy regime. A least-square fit, taking into account the instrument PSF and its evolution with energy, gives the most probable position of GRS 1739–278 at R.A. = $17^{\text{h}}39^{\text{m}}31^{\text{s}}$ and decl. = $-27^\circ45'52''$ (equinox 1950), the radius of the related 90% confidence error circle being $\approx 3'$. It appears that GRS 1739–278 is situated $\approx 1^\circ$ from GRO J1744–28 and ≈ 1.4 from the dynamical center of the Galaxy. Figure 2 shows the light curve of GRS 1739–278 derived from the spring 1996 campaign in the 40–150 keV energy band. The source average intensities are, respectively, 70 ± 7 mcrab and 58 ± 10 mcrab in the 40–75 keV and 75–150 keV energy bands, leading to an average hardness ratio of 0.83 ± 0.13 , this latter parameter being defined as the ratio between the flux measured in the high-energy band and that in the low one. The average intensity recorded between 150 keV and 300 keV is 57 ± 28 mcrab.

We summed up the spectra obtained during the eight observations to construct the summed spectrum as presented in Figure 3. Using the instrument response matrix, we have compared a power-law ($I_\nu \propto E^{-\alpha}$) and a Comptonization parameterization (Sunyaev & Titarchuk 1980) to these data. The best-fit parameters are reported in Table 2. The average observed spectrum is well fitted by a power law with an index $\alpha \approx 2.2$ and an integrated energy flux in the 40–300 keV energy band of $9.9 \pm 2.3 \times 10^{-10}$ ergs $\text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}$.

TABLE 1
SIGMA OBSERVATIONAL LOG OF GRS 1739–278

Session	Date (U.T.)	Exposure (hr)
894	1996 Mar 15.63–Mar 16.68	9.84
895	1996 Mar 16.82–Mar 18.23	23.05
896	1996 Mar 18.92–Mar 20.38	23.83
897	1996 Mar 20.77–Mar 22.48	24.68
898	1996 Mar 23.52–Mar 24.52	16.39
899	1996 Mar 24.77–Mar 26.48	19.69
900	1996 Mar 27.60–Mar 28.66	17.19
901	1996 Mar 28.79–Mar 30.50	19.67

We finally reanalyzed the SIGMA database to check if the source was active before its 1996 March outburst. The SIGMA database contains 163 observation sessions performed before 1996 March, in the spring and fall of years from 1990 to 1994 and in the fall of 1995, where GRS 1739–278 was in the telescope field of view. We detect the source neither in any of these individual sessions, nor in the summed image (2546 hr of effective exposure time), where the 3σ upper limits of the average flux derived at the source position are, respectively, 4 mcrab and 5 mcrab in the 40–75 keV and 75–150 keV energy bands, indicating no significant detection of persistent emission.

3. DISCUSSION

Thanks to the accurate position of GRS 1739–278 provided by the coded-mask imaging technique, its counterpart at X-ray wavelengths has been promptly identified. Using the TTM X-ray experiment on board the Kvant module attached to the Russian *Mir* station, Borozdin, Alexandrovich & Sunyaev (1996) have reported the presence of a bright soft X-ray source with a $1'$ error circle radius, as measured in the 2–27 keV band, that lies within the SIGMA error circle (Fig. 4). The 2–27 keV source flux, as measured by TTM, was 200 ± 50 mcrab on February 28 and 500 ± 50 mcrab on March 1. The observation of GRS 1739–278 performed by the *Rossi X-Ray Timing Explorer* (RXTE) PCA led to the detection of a bright, soft source with activity in the 2–60 keV band that was at maximum on March 16 (at a flux level of ≈ 810 mcrab) and slowly

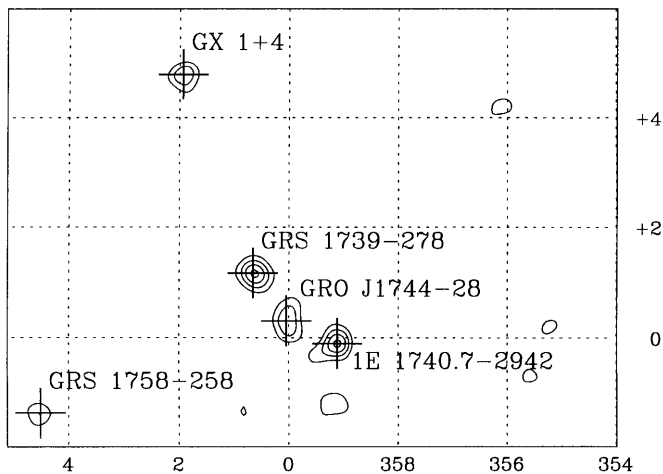


FIG. 1.—Map of the GC region observed by SIGMA from 1996 March 15 to 1996 March 30 in the 40–150 keV energy band. Contours begin at 3.5σ with steps of 2σ . Crosses indicate the positions of the five sources detected by SIGMA.

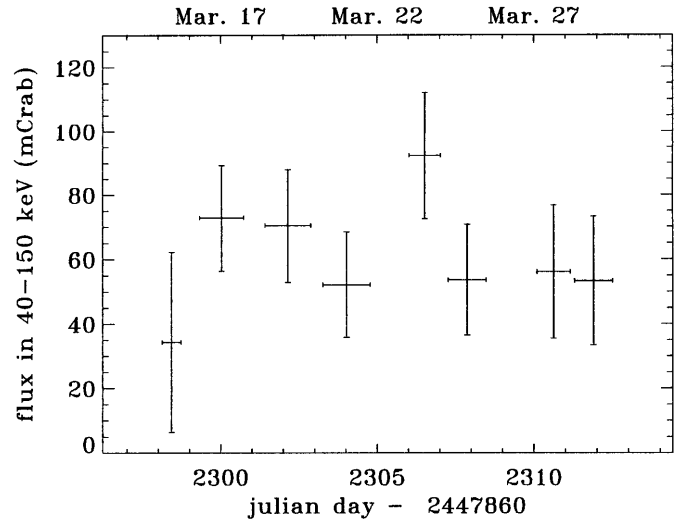


FIG. 2.—Light curve of GRS 1739–278 in the energy band 40–150 keV. Upper limits are at the 2σ confidence level.

decreasing afterwards (Takeshima, Cannizzo, & Corbet 1996). Such behavior was confirmed by the RXTE All-Sky Monitor (Levine et al. 1996), which detected GRS 1739–278 in the 2–10 keV band at a level of ≈ 250 mcrab in early March, reaching a peak of ≈ 800 mcrab around March 20, and declining to ≈ 350 mcrab in late April. On March 31, the ROSAT High-Resolution Imager detected a bright X-ray source within the SIGMA and TTM error circles (Dennerl & Greiner 1996). Finally, Hjellming et al. (1996) reported the VLA detection of a probable radio counterpart of GRS 1739–278 just inside the ROSAT error circle (see Fig. 4), while Mirabel et al. (1996) detected a possible near-infrared counterpart, also within $1''$ of the VLA source.

At first glance it appears, from the observational material

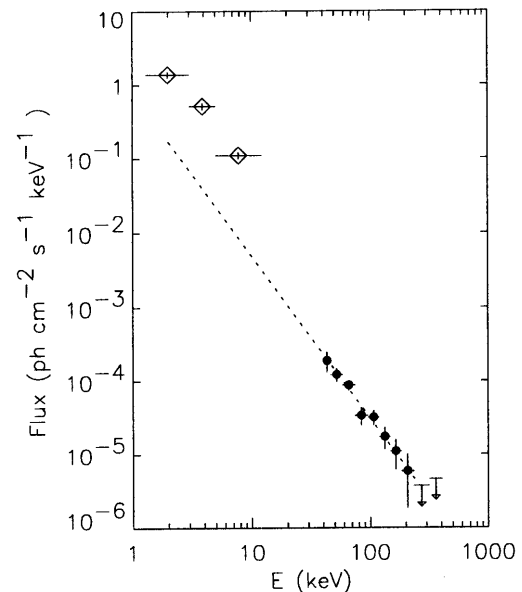


FIG. 3.—Summed spectrum of GRS 1739–278 derived from observations performed from 1996 March 15 to 1996 March 30. Dotted line represents the best power-law fit. Upper limits are at the 1σ confidence level. The diamonds are the source fluxes estimated from RXTE/ASM counting rates measured on 1996 March 22.

TABLE 2
SPECTRAL PARAMETERS^a DERIVED
FOR GRS 1739–278

Parameter	Value
Power-Law	
$F_{60\text{ keV}}^b$	9.5 ± 0.8
α	2.2 ± 0.3
χ^2	0.78 (36 d.o.f.)
Comptonization Disk Geometry	
$F_{60\text{ keV}}^b$	9.6 ± 0.8
kT_e (keV)	68 (–30/+130)
τ	0.53 (–0.53/+0.53)
χ^2	0.84 (32 d.o.f.)

^a Errors are at 68% confidence level in one parameter.

^b In 10^{-5} photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}$.

collected by SIGMA from 1996 March 15 until 1996 March 30 and supplemented by nearly contemporaneous X-ray data, that GRS 1739–278 should be added to the list of hard X-ray transients. It should be further pointed out that with its spectral behavior, featuring a bright soft X-ray component and a hard component extending well beyond 100 keV (see Fig. 3), GRS 1739–278 is reminiscent of transient sources often classified as ultrasoft X-ray transient (USXT), which are suspected to harbor BHs. This type of source, of which GRS 1124–648 \equiv Nova Muscae 1991 is the best example (Grebenev et al. 1992; Ebisawa, Ogawa, & Aoki 1994), is effectively known to exhibit a bright hard tail extending toward the soft γ -ray domain (Goldwurm et al. 1992; Sunyaev et al. 1992).

According to the position of GRS 1739–278 on the celestial sphere, close to that of the GC, and to the rather large amount of absorbing material in front of the source, with a column density of $N_H \approx 4.1 \pm 0.7 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ as estimated in the X-ray band by Borozdin et al. (1996), we postulate that GRS 1739–278 lies inside the Galactic bulge. We can then infer for GRS 1739–278 a peak luminosity of $8.6 \pm 2.0 \cdot 10^{36} \text{ ergs s}^{-1}$ in the 40–300 keV energy band, taking 8.5 kpc as the distance between the GC and the Sun. During the GC campaign carried out in 1994 September, SIGMA discovered another transient source (GRS/KS 1730–312) with soft X-ray spectral behavior resembling those of USXTs and with an average hard spectrum that was shown to be rather compatible with those of hard X-ray transients already observed by SIGMA (Vargas et al. 1996b; Trudolubov et al. 1996). It is thus tempting to classify GRS 1730–312 as another X-ray nova like Nova Muscae. Because of its location close to the GC and the amount of absorbing material in front of it, this source was also assumed by Vargas et al. (1996b) to be harbored in the Galactic bulge, implying an average luminosity above 40 keV of $\approx 10^{37} \text{ ergs s}^{-1}$.

The SIGMA telescope observed two other hard X-ray transients which present different temporal and spectral behavior. GRO J0422+32 \equiv Nova Persei 1992, detected by SIGMA on 1992 August 15 (Roques et al. 1994; Vikhlinin et al. 1995), i.e., a few days after the peak luminosity as observed by BATSE/CGRO in the hard X-ray domain (Harmon et al. 1994), and GRS 1716–249 \equiv Nova Ophiuchi 1993, discovered with SIGMA in 1993 September (Gilfanov et al. 1995), are much less active in the soft X-ray band, but their spectral behavior in the hard regime is comparable to that of Nova Muscae.

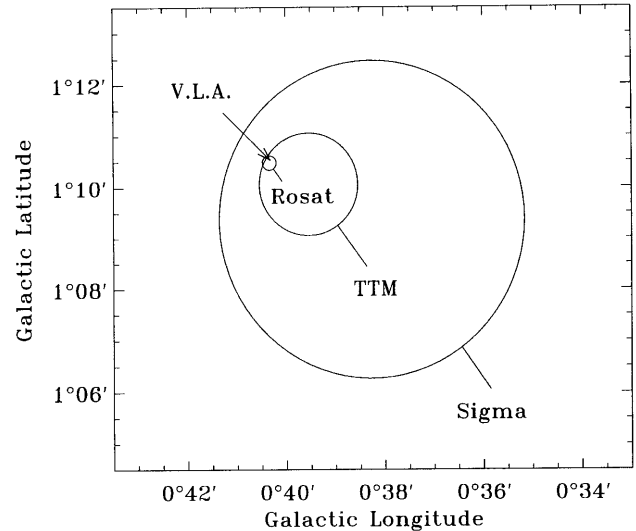


FIG. 4.—Error circles of GRS 1739–278 as derived from SIGMA, TTM, and ROSAT observations. The arrow locates the VLA position.

The fact that the peak luminosity of GRS 1730–312 is remarkably similar to that of GRS 1739–278 motivates us to consider the possibility that the hard (>40 keV) luminosity of novae similar to Nova Muscae saturates to a somewhat similar peak value of $\approx 10^{37} \text{ ergs s}^{-1}$. In this context, the hard X-ray peak luminosity of hard X-ray transients could be used as a distance indicator. This assumption is in agreement with a hard X-ray emission model of accreting BHs performed by Chakrabarti & Titarchuk 1995 (hereafter CT95; see also Ebisawa, Titarchuk & Chakrabarti, 1996). CT95 explain that the hard component rising phase is due to thermal Comptonization of soft photons in a hot cloud close to the BH. The flux increases proportionally with the mass accretion rate in the disk (or with the soft photon disk flux). When the accretion rate reaches a critical value, for which the soft photon flux becomes comparable to the gravitational energy release in the cloud, a rapid transition takes place during which the hot cloud is cooled down and free-fall bulk motion becomes responsible for the hard X-ray emission. The hard X-ray component decreases rapidly, and its spectral shape turns to an extended power law with photon index $\alpha \approx 2.5$ without exponential break, while the ultrasoft disk component emerges. For similar plasma cloud optical depths and fractions of soft photons intercepted by the plasma cloud, the hard X-ray luminosity at which phase transition occurs is expected to be the same, thus implying the above-quoted distance criterion.

Using this distance indicator, we derived for Nova Muscae a distance of 2.2 kpc, which is compatible with those derived from independent arguments. In spite of the fact that the hard components of Nova Persei 1992 and Nova Ophiuchi 1993 may result from a different mechanism than that of Nova Muscae, as suggested by CT95, we have applied our distance criterion to these bright hard X-ray transients also observed by SIGMA (see Table 3). It is worth noting that the distances we derived are in agreement with other estimates. If one excludes recurrent transient sources (e.g., GRS 1915 + 105), another bright hard X-ray transient (GRS 1009–45 \equiv Nova Velorum 1993) has been detected by BATSE in the hard X-ray regime (Harmon et al. 1994). The peak flux derived from BATSE data and the distance evaluated from its hard X-ray peak luminosity

TABLE 3
DISTANCE AND FLUX OF BRIGHT HARD X-RAY TRANSIENTS
OBSERVED BY SIGMA

Current Name	Flux in the 40–300 keV Band (ergs cm ⁻² s ⁻¹)	Distance (kpc)
GRS 1739–278.....	9.9 10 ⁻¹⁰	8.5 ^a
GRS 1730–312.....	10.4 10 ⁻¹⁰	8.5 ^a
Nova Muscae 1991	1.5 10 ⁻⁸	2.2 ^b , 1.4 ^c to 11 ^d
Nova Persei 1992	6.4 10 ⁻⁸	1.2 ^b ; <2.2 ^c
Nova Ophiuchi 1993....	1.8 10 ⁻⁸	1.9 ^b ; 2 to 2.8 ^f
Nova Velorum 1993	1.0 10 ⁻⁸ ^g	2.6 ^b

^a Assumed.

^b This work.

^c Della Valle, Jarvis, & West 1991.

^d Greiner et al. 1994.

^e Callanan et al. 1996.

^f Della Valle, Mirabel, & Rodriguez 1994.

^g Estimated from Harmon et al. 1994.

are also reported in Table 3. Considering the apparent faintness of the two X-ray novae supposed to be located in the

Galactic bulge, it appears that because of their limited sensitivity, the soft γ -ray instruments of the present generation can only detect this type of source within a limited region of the Galaxy. Future high-energy missions, such as *INTEGRAL*, should be in a much better position to detect most of the Galactic hard X-ray transients.

The authors wish to thank Lev Titarchuk for useful discussions on the emission mechanisms of accreting black holes. We thank the anonymous referee for his valuable comments and his encouragement to go further in the discussion of the paper. We acknowledge the outstanding contribution of the SIGMA Project Group of CNES Toulouse Space Center to the overall success of the SIGMA mission. We also thank the staffs of the Baikonur Space Center, the Lavotchkine Space Company, the Babakin Space Center, and the Evpatoria Ground Station for their unfailing support. This research has made use of data obtained through the High Energy Astrophysics Science Archive Research Center Online Service, provided by the NASA/Goddard Space Flight Center.

REFERENCES

- Borozdin, K., Alexandrovich, N., & Sunyaev, R. 1996, IAU Circ. 6350
 Bouchet, L., Paul, J., Gilfanov, M., & Sunyaev, R. 1996, IAU Circ. 6343
 Callanan, P. J., Garcia, M. R., McClintock, J. E., & Zhao, P. 1996, ApJ, 461, 351
 Chakrabarti, S. K., & Titarchuk, L. G. 1995, ApJ, 455, 623 (CT95)
 Churazov, E., et al. 1994, ApJS, 92, 381
 Della Valle, M., Jarvis, B. J., & West, R. M. 1991, Nature, 353, 50
 Della Valle, M., Mirabel, I. F., & Rodriguez, L. F. 1994, A&A, 290, 803
 Dennerl, K., & Greiner, J. 1996, IAU Circ. 6426
 Ebisawa, K., Ogawa, M., & Aoki, T. 1994, PASJ 46, 375
 Ebisawa, K., Titarchuk, L., & Chakrabarti, S. K. 1996, PASJ, 48, 59
 Fishman, G. J., et al. 1995, IAU Circ. 6272
 Gilfanov, M., et al. 1995, Proc. of the 4th Annu. Astrophys. Conf. in Maryland (Dordrecht: Kluwer), 221
 Goldwurm, A. 1995, Exp. Astron., 6, 9
 Goldwurm, A., et al. 1992, ApJ, 389, L79
 ———. 1994, Nat., 371, 589
 Grebenev, S. A., et al. 1992, Soviet Astron. Lett., 18, 11
 Greiner, J., Hasinger, G., Molendi, S., & Ebisawa, K. 1994, A&A, 285, 509
 Harmon, B. A., Zhang, S. N., Wilson, C. A., Rubin, B. C., & Fishman, G. R. 1994, AIP Conf. Proc. 304, The Second Compton Symposium, ed. N. Gehrels, C. E. Fichtel, & J. P. Norris (New York: AIP), 210
 Hjellming, R. M., Rupen, M. P., Mati, J., Mirabel, F., & Rodriguez, L. F. 1996, IAU Circ. 6383
 Levine, A. M., et al. 1996, IAU Circ. 6390
 Mirabel, I. F., Marti, J., Duc, P. A., & Rodriguez, L. F. 1996, IAU Circ. 6427
 Paul, J., et al. 1991, Adv. Space Res., 11(8), 289
 Paul, J., Bouchet, L., Churazov, E., & Sunyaev, R. 1996, IAU Circ. 6348
 Roques, J.-P., et al. 1994, ApJS, 92, 451
 Sunyaev, R. A., et al. 1992, ApJ, 389, L75
 ———. 1994, Astron. Lett., 20, 777
 Sunyaev, R. A., & Titarchuk, L. G. 1980, A&A, 86, 121
 Takeshima, T., Cannizzo, J. K., & Corbet, R. 1996, IAU Circ. 6390
 Trudolubov, S., et al. 1996, Astron. Lett., 22(5), 664
 Vargas, M., et al. 1996a, ASP Conf. Ser., in press
 Vargas, M., et al. 1996b, A&A, 313, 828
 Vikhlinin, A., et al. 1995, ApJ, 441, 779

High-energy observations of the state transition of the X-ray nova and black hole candidate XTE J1720-318

M. Cadolle Bel¹, J. Rodriguez^{1,2,3}, P. Sizun¹, R. Farinelli⁴, M. Del Santo⁵, A. Goldwurm^{1,6}, P. Goldoni^{1,6},
S. Corbel^{1,7}, A. N. Parmar⁸, E. Kuulkers⁸, P. Ubertini⁵, F. Capitanio⁵, J.-P. Roques⁹, F. Frontera^{4,10},
L. Amati¹⁰, and N. J. Westergaard¹¹

¹ Service d'Astrophysique, DAPNIA/DSM/CEA - Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France
e-mail: mcadolle@cea.fr

² Integral Science Data Center, Chemin d'Ecogia, 16, 1290 Versoix, Switzerland

³ CNRS FRE 2591, France

⁴ Physics Department, University of Ferrara, 44100 Ferrara, Italy

⁵ IASF-CNR, Via del Fosso del Cavaliere 100, 00133 Roma, Italy

⁶ Fédération de Recherche APC, 11 place M. Berthelot, 75231 Paris, France

⁷ Université Paris VII, France

⁸ Research and Scientific Support Department, ESA, ESTEC, Keperlaan 1, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands

⁹ Centre d'Étude Spatiale des Rayonnements, CNRS, Toulouse Cedex 4, France

¹⁰ IASF-CNR Section of Bologna, Via P. Gobetti 101, 40129 Bologna, Italy

¹¹ Danish Space Research Institute, Juliane Maries Vej 30, Copenhagen 02100, Denmark

Received 14 May 2004 / Accepted 7 July 2004

Abstract. We report the results of extensive high-energy observations of the X-ray transient and black hole candidate XTE J1720-318 performed with INTEGRAL, XMM-Newton and RXTE. The source, which underwent an X-ray outburst in 2003 January, was observed in February in a spectral state dominated by a soft component with a weak high-energy tail. The XMM-Newton data provided a high column density N_H of $1.2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ which suggests that the source lies at the Galactic Centre distance. The simultaneous RXTE and INTEGRAL Target of Opportunity observations allowed us to measure the weak and steep tail, typical of a black-hole binary in the so-called High/Soft State. We then followed the evolution of the source outburst over several months using the INTEGRAL Galactic Centre survey observations. The source became active again at the end of March: it showed a clear transition towards a much harder state, and then decayed to a quiescent state after April. In the hard state, the source was detected up to 200 keV with a power law index of ~ 1.9 and a peak luminosity of $\sim 7 \times 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ in the 20–200 keV band, for an assumed distance of 8 kpc. We conclude that XTE J1720-318 is indeed a new member of the black hole X-ray novae class which populate our galactic bulge and we discuss its properties in the frame of the spectral models used for transient black hole binaries.

Key words. black hole physics – accretion, accretion disks – X-rays: binaries – gamma-rays: observations – stars: individual: XTE J1720-318

1. Introduction

X-ray Novae (XN), also called soft X-ray transients, are low mass X-ray binaries where a compact object accretes at a very low rate from a late type companion star (Tanaka & Shibazaki 1996). Although they are usually in a quiescent state (and therefore nearly undetectable), they undergo bright X-ray outbursts, with typical recurrence periods of many years, which last several weeks or even months before the source returns to quiescence. Most of the XN are associated to dynamically proven Black Holes (BH) and indeed the great majority of the known 18 Black Hole Binaries (BHB) as well as of the 22 binary Black Hole Candidates (BHC) are transients (McClintock & Remillard 2003). Because of large changes in the effective accretion rates that occur during the XN outbursts and the very

hard spectra they usually display, these sources provide powerful probes of the accretion phenomena and radiation processes at work in BH, and are primary targets for high-energy instruments. Indeed, during their outbursts, these sources often undergo changes in their spectral and temporal characteristics; they may pass through the different *spectral states* observed in BHB (Tanaka & Lewin 1975; McClintock & Remillard 2003). The two principal states of BHB are the Low/Hard State (LHS) and the High/Soft State (HSS). In the latter, the emission is dominated by a very soft ($kT \sim 1 \text{ keV}$) component generally interpreted as the thermal radiation from an optically thick and geometrically thin accretion disc (Shakura & Sunyaev 1973). A weak and steep power law may also be present and little variability is observed. In the LHS, the spectrum is rather described by a hard power law with photon index in the range 1.5–2.0 and

a break around 100 keV. The LHS is also characterized by large timing variability. Intermediate states (namely the intermediate state and the very high soft state) are also observed, where both the soft and hard components are present; the source displays a complicated pattern of timing properties. In spite of the recent advances in the characterization of BHB spectral states and modelling of the emission components, the basic mechanisms which generate the state transitions and in particular the origin of the hard component are not yet understood. Detection and broad band studies of new BH systems is therefore essential to acquire better statistics on the phenomenology of the BHB spectral states and on the relations between their emission components.

Since XN probably follow the galactic stellar distribution, they are concentrated in the direction of the bulge of our Galaxy (with a higher density towards the centre). The SIGMA gamma-ray telescope on board the GRANAT satellite, and later the hard X-ray instruments on board Rossi XTE and Beppo SAX discovered and studied several (about 10) BHC XN in the bulge. INTEGRAL, the INTERNATIONAL Gamma-Ray Astronomy Laboratory (Winkler et al. 2003) is a European Space Agency observatory launched on 2002 October 17, carrying four instruments: two main gamma-ray instruments, IBIS (Ubertini et al. 2003) and SPI (Vedrenne et al. 2003), and two monitors, JEM-X (Lund et al. 2003) and OMC (Mas-Hesse et al. 2003). The IBIS coded mask instrument is characterised by a wide Field of View (FOV) of $29^\circ \times 29^\circ$ ($9^\circ \times 9^\circ$ fully coded), a point spread function of $12'$ FWHM and it covers the energy range between 20 keV and 8 MeV. The SPI telescope works in the range from 20 keV to 8 MeV with a FOV of 31° diameter (16° fully coded), an angular resolution of 2.5° (FWHM) and a typical energy resolution of 2.5 keV at 1.3 MeV. The JEM-X monitor provides spectra and images with arcminute angular resolution in the 3 to 35 keV band, with a FOV of about 10° diameter. Thanks to its instruments performances and to the survey program specifically dedicated to the Galactic Centre (GC) region, INTEGRAL allows the detection and study of the hard X-ray emission from BH XN at large distances and at weaker flux levels than before.

XTE J1720-318 was discovered on 2003 January 9 with the All Sky Monitor (ASM) on board RXTE as a transient source undergoing an X-ray nova like outburst (Remillard et al. 2003). The source 1.2–12 keV flux increased to the maximum value of ~ 430 mCrab in 2 days (see Fig. 1); then its flux started to decay slowly. Follow up observations with the Proportional Counter Array (PCA) on board RXTE showed the presence of a 0.6 keV thermal component and a hard tail. The spectral parameters and the source luminosity were typical of a BH (Markwardt 2003) in the so-called HSS. Soon after, a radio counterpart was identified with the VLA and ATCA radio telescopes (Rupen et al. 2003; O'Brien et al. 2003), leading to the estimate of the most precise position $\alpha_{J2000} = 17^h 19^m 58^s.985$, $\delta_{J2000} = -31^\circ 45' 01''.109 \pm 0''.25$. The detection of its infrared counterpart (Nagata et al. 2003) provided a measure of the extinction which is compatible with a location of XTE J1720-318 at large distance, probably several kpc.

XTE J1720-318 was observed by XMM-Newton, RXTE and INTEGRAL in 2003 February during dedicated Target

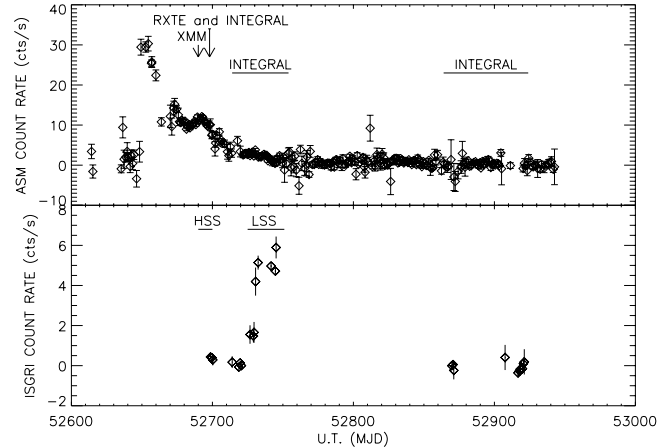


Fig. 1. *Top:* the RXTE/ASM daily average 1.2–12 keV light curve of XTE J1720-318 from few days before the outburst to 2003 October. The arrows show the dates of the XMM-Newton, RXTE and INTEGRAL observations. The approximate periods of later INTEGRAL observations are indicated by horizontal lines. Universal time is reported in units of MJD. *Bottom:* the 20–120 keV IBIS/ISGRI light curve of XTE J1720-318 with time bins of 2 days (rev. 46 to 122). The data used to build spectra for HSS and LHS are indicated by horizontal lines.

of Opportunity (ToO) observations. It was then observed by INTEGRAL during the surveys of the GC region performed in March and April and again from 2003 August to October. We report here the results based from these observations, starting with the description of the available data and of the analysis procedures employed (Sect. 2). We then report the results in Sect. 3 before discussing them in Sect. 4.

2. Observations and data reduction

XTE J1720-318 was observed by XMM-Newton on 2003 February 20, during a public 18.5 ks ToO. Preliminary analysis of these data provided an improved X-ray position of the source (Gonzalez-Riestra et al. 2003), confirming the association with the radio and IR source. One week after, we performed an INTEGRAL ToO observation of XTE J1720-318 which started on 2003 February 28 with a 176 ks exposure. The latter was conducted in coordination with a RXTE ToO observation which lasted about 2 ks. The source was further observed during the INTEGRAL Core Program during a series of exposures dedicated to the GC survey, from March 25 to April 19 for a total of 551 ks observing time. Another 275 ks exposure on the source has been accumulated during ToOs on H 1743-322 (Parmar et al. 2003) in 2003 April. The field containing XTE J1720-318 has also been extensively monitored (about 700 ks exposure time) during the second part of the 2003 INTEGRAL GC survey.

The log of the observations and data used in this work is summarized in Table 1. Figure 1 (top panel) shows the 1.2–12 keV RXTE/ASM light curve of XTE J1720-318 and also indicates the intervals covered by the dedicated XMM-Newton, RXTE and INTEGRAL observations discussed here.

Table 1. Log of the XTE J1720-318 observations analysed in this paper.

Spacecraft	Observation period Dates (2003) (# revolution)	Exposure (ks)	Instruments	Observation type /Mode
XMM-Newton	02/20	18.5	EPIC-PN	ToO/Small Window
Rossi-XTE	02/28	2 ks	PCA	ToO
INTEGRAL	02/28–03/02 (46)	176	JEM X-2 + IBIS	ToO ^a
INTEGRAL	03/15–04/03 (51–57)	361	IBIS	GCDE
INTEGRAL	04/06–04/22 (58–63)	175	IBIS + SPI	ToO on H 1743-322 ^a
INTEGRAL	04/12–04/19 (60–62)	191	IBIS + SPI	GCDE
INTEGRAL	08/02–10/16 (103–122)	700	IBIS	GCDE

Notes: ^a 5×5 dithering pattern around the target.

2.1. XMM-Newton data analysis

We present here the data taken with the EPIC-PN camera on board XMM-Newton. The PN camera was operating in Small Window mode. We processed the data using the *Scientific Analysis System* v5.4.1 and the calibration files updated at the end of 2003 March. We first filtered our data for background flares. Since XTE J1720-318 was bright at the date of the observation (resulting in a strong pile up in the PN camera), we adopted the selection criteria suggested by Guainazzi (2001) to obtain the source spectrum. We extracted the single events from an annulus with an internal radius of $15''$, and an outer radius of $29''$ around the position of XTE J1720-318. As we only used single events in this corona, the effective exposure time of the extracted spectrum was about 6 ks.

We obtained the background spectrum from a sky region far from the source and we built the response matrix (RMF) and ancillary response (ARF) files consistent with the selections. Adding 2.5% systematics, the resultant spectrum was then fitted with XSPEC v11.3.0 (Arnaud 1996) between 0.7 and 11 keV.

2.2. Rossi XTE data analysis

We reduced and analysed the RXTE data with the LHEASOFT package v5.3. We reduced the data from the PCA following the standard methods explained in the ABC of RXTE and the cook book. The good time intervals (GTI) were defined when the satellite elevation was $>10^\circ$ above the Earth's limb, and the off-set pointing $<0.02^\circ$. We also chose to retain the data taken when most of the Proportional Counter Units (PCU) were turned on (a maximum of 5 here). We extracted the spectra from the standard 2 data, from the top layer of each PCU. Background spectra were produced with *pcabackest* v3.0, using the latest calibration files available for bright sources. The RMF and ARF were generated with *pcarsp* v8.0. Due to uncertainties in the PCA RMF, we included some systematic errors in the spectra. To estimate the level of those systematics, we reduced and analysed a contemporary Crab observation. To obtain a reduced χ^2 of 1 when fitting the Crab spectra, we set the level of systematics as follows: 0.6% between 2 and 8 keV and 0.4% above 8 keV. We fitted the spectra between 3–25 keV for the PCA. We also processed HEXTE data but, due to the poor statistics, we did not include the few HEXTE data points in the analysis.

For the timing analysis, we extracted 16 s resolution PCA light curves from standard 2 data, using all PCUs and all layers, between 2 and 20 keV (absolute channels 5–49), and corrected them for background. We extracted high temporal resolution light curves from the event mode data with a nominal resolution of 2^{-13} s (i.e. $\sim 125 \mu\text{s}$) rebinned to 1 ms during the extraction processes. Three such light curves were extracted between absolute channels 5–49 (2–20 keV epoch 5), 17–49 (7–20 keV) and 24–49 (10–20 keV).

2.3. INTEGRAL data analysis

An INTEGRAL observation is made of several pointings (science windows, hereafter SCW) each having exposure time lasting from 1800 to 3600 s and following a special pattern on the plane of the sky (Courvoisier et al. 2003). Except for the 5×5 dithering mode for ToOs, the entire GC region was observed in the framework of the Galactic Centre Deep Exposure (GCDE) program (Winkler 2001). Deep exposures in the GC radian (± 30 deg in longitude, ± 20 deg in latitude centred at $l = 0$, $b = 0$) are obtained with a set of individual pointings lasting 30 min each on a regular pointing grid.

All the INTEGRAL instruments were operating simultaneously. We describe here mainly results obtained from the data recorded with the ISGRI detector (Lebrun et al. 2003) of the IBIS telescope covering the spectral range from 20 to 800 keV. For the first observation set, when the source was very soft, we also present data from the JEM-X instrument. The IBIS data have been reduced with the *Offline Scientific Analysis* (OSA) v3.0 delivered in December 2003 to produce images and extract spectra for each SCW (Goldwurm et al. 2003). We selected SCW for which the source was within 8° from the telescope axis. For the spectral analysis, we used a 12 linearly rebinned channel RMF and the associated recently corrected ARF (P. Laurent, 2003 December, private communication). The resultant spectrum was fitted between 20 and 600 keV, but above 200 keV the source is not always significantly detected and below 20 keV systematic uncertainties are still very high. Systematics errors at level of 8% (see Sect. 3.3) were applied in the spectral fits to account for the residual effects of the response matrix (Goldwurm et al. 2003). For the image analysis, the background derived from empty fields was subtracted before deconvolution and we used a catalog of about 41 sources to analyse the images. The total amount of IBIS data we

processed was equivalent to about 1700 ks of exposure time, however due to selections performed and the fact that the source was very often off-axis, the effective exposure time is reduced to 652 ks.

We reduced the JEM-X data with OSA v3.0. Only the JEM-X2 monitor was operated during our observation. Because of uncertainties in the RMF for high off-axis angles, we selected only SCW where the source was closest to the centre of the field of view (i.e. $<3^\circ$ from the telescope axis). The energy channels were also rebinned so as to have a $\sigma > 3$. When all these conditions hold, we extracted the spectra for an effective exposure time of 21 ks. We fitted the resultant averaged spectrum between 3.5 and 26.5 keV, with the standard RMF and ARF.

Concerning SPI, the data obtained during revolutions (hereafter, rev.) 58 and 60 to 63 were reduced using the *Spi_science_analysis_2* script (Knödlseider 2004) available in OSA v3.0 (February 2004). Images were then extracted between 20 and 40 keV to build a catalogue of sources. Spectra were finally extracted for each data set with 50 logarithmic bins in the 20–1000 keV energy range, using Spiros (Skinner & Connell 2003). We used the imaging results from the IBIS/ISGRI telescope to determine the active sources of the region in order to account for their contribution in the SPI spectral extraction. The latter was performed with a background model derived from the evolution of the saturated count rates in the Ge detectors while the ratios between detectors were left free in the analysis. A few SCW with a bad χ^2 were excluded. Extracted with Image Response Files v15, the resulting spectra were fitted with the RMF delivered in 2004 February.

3. Results of the analysis

3.1. The INTEGRAL detection of the XTE J1720-318 state transition

The 20–120 keV IBIS/ISGRI light curve of XTE J1720-318 from the whole set of the 2003 INTEGRAL data is shown in Fig. 1 (lower panel) on the same scale of the ASM light curve. During the INTEGRAL ToO observation of February 28 (rev. 46, MJD 52699), the source was detected at a very low flux level above 20 keV and 10 days later (i.e. between March 9 and 20), it had decreased below the detection level. Starting from March 25 (MJD 52724, rev. 54), the source appeared to brighten in the INTEGRAL/IBIS energy band. Since a similar behaviour was not seen in the ASM light curve (see Fig. 1, top panel), Goldoni et al. (2003) proposed that the source was entering a hard state. Figure 2 shows the details of this hard flare. The 20–80 keV flux was at the beginning around 2 cts s^{-1} ($\sim 11 \text{ mCrab}$) and increased to a maximum level of 6.25 cts s^{-1} ($\sim 34.5 \text{ mCrab}$) on April 6 (rev. 58, MJD 52737). After this, the flux gradually decreased to the value of 4 cts s^{-1} (rev. 63, MJD 52751). When the INTEGRAL GC survey included the source again in the IBIS FOV in mid August 2003, the transient was not detected and remained below the IBIS/ISGRI detection level for the rest of 2003 (Fig. 1). The derived 3σ upper limit on XTE J1720-318 flux during the mid-August

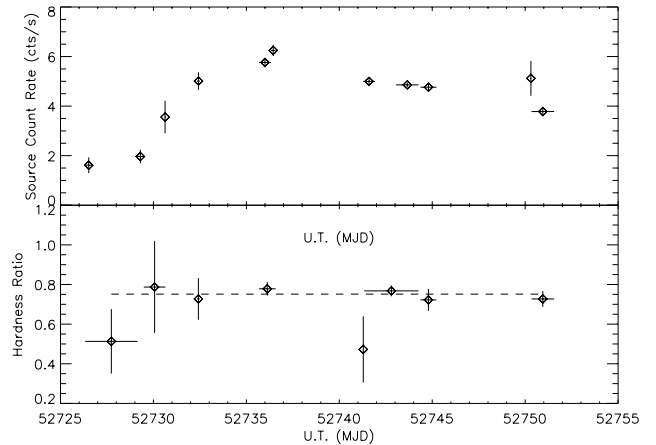


Fig. 2. *Top:* IBIS/ISGRI 20–80 keV light curve with time bins ~ 1 day during the XTE J1720-318 hard flare (rev. 55 to 63). *Bottom:* corresponding hardness ratio, defined as the ratio between the source count rate in the 40–80 keV band and in the 20–40 keV band with time bins of 3 days. The dashed line represents the average HR.

observations (\sim MJD 52869, exposure of 271 ks) is 1.5 mCrab between 20–80 keV.

Figure 2 shows the hardness ratio (HR) measured during the observed increase of the source high energy flux. There is no significant variation in the HR around its mean value of 0.75, only a slight indication of a softer HR (~ 0.5) at the beginning of the flare. We therefore used the whole data of this hard flare to build up an average spectrum (see Sect. 3.3.2). Moreover, we could add the data taken with SPI, which provide us significant points during this period at high energies. We also analysed JEM-X data taken during the hard flare, but due to the fact that the source was often at large off-axis angles and very faint below 20 keV, the derived data points were not significant; therefore, we did not use them in the analysis.

Assuming an exponential shape for both the rise and the decay phases of the hard flare we obtained, using the IBIS/ISGRI data points of Fig. 1 (lower panel), time constants of 13 days (rise) and 48 days (decay) respectively. Since we used the August upper limits for this estimate, the characteristic decay time we derived is therefore only an upper limit. However, the hard flare timescales appear comparable to the main outburst (the characteristic decay time is 60 days) even if the peak broad-band X-ray luminosity remains well below the peak luminosity of the main outburst (see Sect. 3.3).

In the combined IBIS/ISGRI images obtained during the hard outburst (data from rev. 58 to 61), XTE J1720-318 is detected at 94σ in the 20–60 keV range (Fig. 3). The best position found with IBIS from the 20–60 keV image is $\alpha_{J2000} = 17^{\text{h}}19^{\text{m}}58^{\text{s}}.7$, $\delta_{J2000} = -31^{\circ}44'43''.7$ with an accuracy of $0''.45$ at 90% confidence level (Gros et al. 2003). This position is consistent with the most precise position of XTE J1720-318 derived from radio data since the offset is only $17''.7$. The high-energy source is therefore unambiguously associated to the transient.

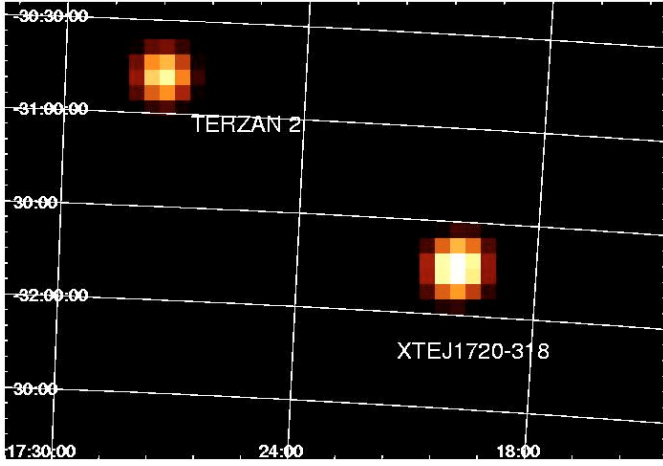


Fig. 3. The IBIS/ISGRI reconstructed sky image of the region around XTE J1720-318 in the 20–60 keV band (rev. 58 to 61). XTE J1720-318 appears at a significance level of 94σ over the background. The other source in the image is the hard X-ray burster located in the globular cluster Terzan 2.

3.2. XTE J1720-318 timing variability during the high/soft state

The XMM-Newton and the INTEGRAL/RXTE observations of February 2003 caught the source in a very soft state (HSS). The source appeared bright at low energies, with a daily-averaged flux between 100 and 140 mCrab in the 1.2–12 keV band. The JEM-X and PCA instruments detected the source at very high significance and we could derive significant spectra up to 20 keV (Fig. 6). However, the high-energy emission was quite weak. IBIS detected the source at a level of 0.4 ± 0.07 cts s⁻¹ (~ 2.1 mCrab) in the 20–120 keV band with a signal of 6σ , providing only few data points at energies higher than 50 keV. As RXTE/HEXTE provided low significant data points at energy ≥ 20 keV, we did not include them in the spectra (described in Sect. 3.3.1).

The PCA 2–20 keV light curves are shown in Fig. 4. XTE J1720-318 shows some variations around a mean value of ~ 750 cts s⁻¹ in the first set, and 721 cts s⁻¹ in the second set. A slight decrease is visible from the first observation to the second (Fig. 4). The light curve of the latter is characterised by an increase of the flux to ~ 750 cts s⁻¹, during a ~ 200 s small flare. We produced Power Density Spectra in the 3 energy ranges described in Sect. 2.2 with POWSPEC v1.0. These energy dependant PDS were produced on interval length of 16 s between 62.5 mHz and 500 Hz. All the intervals (from the 2 data sets) were averaged in a single frame, and a geometrical rebinning has been applied. The 2–20 keV Leahy normalised PDS is flat (Fig. 4, lower panel). The best-fit model is a constant value of 1.993 ± 0.004 (at the 90% confidence level) with a χ^2 of 87.6 (105 degrees of freedom, hereafter d.o.f.). This value is compatible with the expected Leahy normalised value of 2 for purely Poisson noise (white noise). At higher energy the PDSs are also flat. The 3σ upper limits on the 2–20 keV fractional level of variability is $\sim 6.7\%$. In the higher energy ranges, the upper limit is rather high and meaningless due to the low statistics of the source.

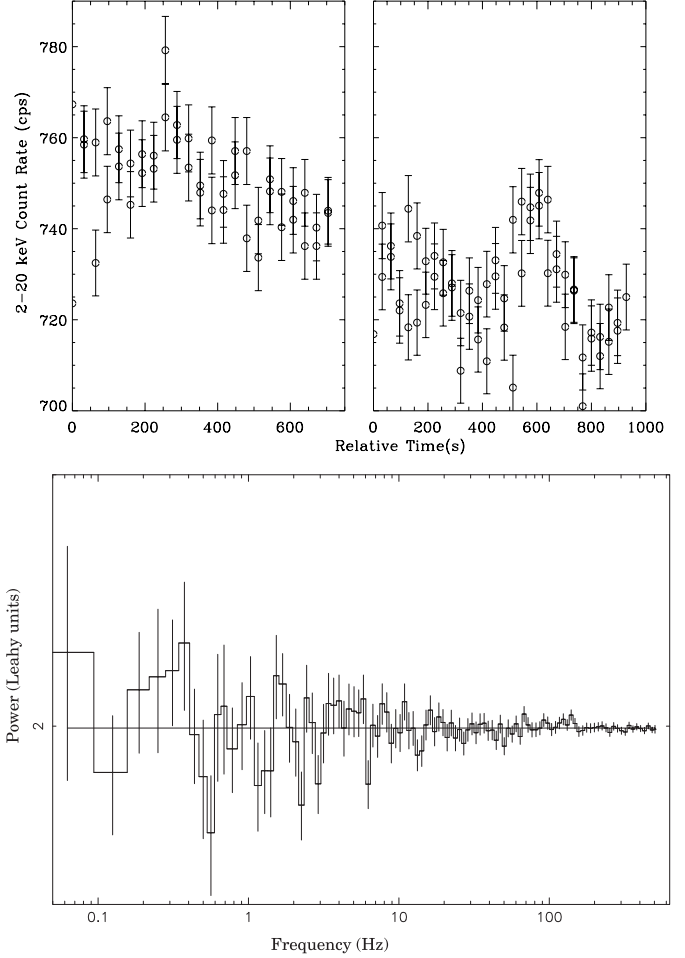


Fig. 4. Top: 2–20 keV RXTE/PCA light curves in counts per second, covering the two data sets. For both, relative time 0 refers to the beginning of the GTIs: time 0 corresponds to MJD = 52 698.506(28) (left panel) and to MJD = 52 699.487(31) (right panel). The time sampling is 16 s. Bottom: 2–20 keV PDS of the combined RXTE/PCA data sets. The best-fit (constant) is superimposed as a line.

3.3. Spectral results

3.3.1. The high/soft state spectrum

We have fitted the XMM-Newton EPIC-PN data with a model composed of an absorbed multi-colour black-body disc (MCD, Mitsuda et al. 1984) plus a power law. A single absorbed MCD alone leads to a poor fit ($\chi^2 = 1349$ for 1064 d.o.f.), as does a single absorbed power law ($\chi^2 = 14825$ for 1064 d.o.f.). The best-fit parameters derived from our analysis are given in Table 2. We obtained for $N_H = (1.24 \pm 0.02) \times 10^{22}$ cm⁻². The unabsorbed flux in the 0.7–10 keV range is 6.43×10^{-9} erg cm⁻² s⁻¹. Assuming a distance of 8 kpc (see discussion), we derive a 0.7–10 keV unabsorbed luminosity of 4.9×10^{37} erg s⁻¹. The disc component accounts for more than 85% of the total 2–100 keV luminosity. If we assume a line of sight inclination angle (θ) of 60° , we find, from the disc normalisation, an inner disc radius of 48.7 ± 0.5 km. Figure 5 shows the resultant EF(E) spectrum and its best-fit.

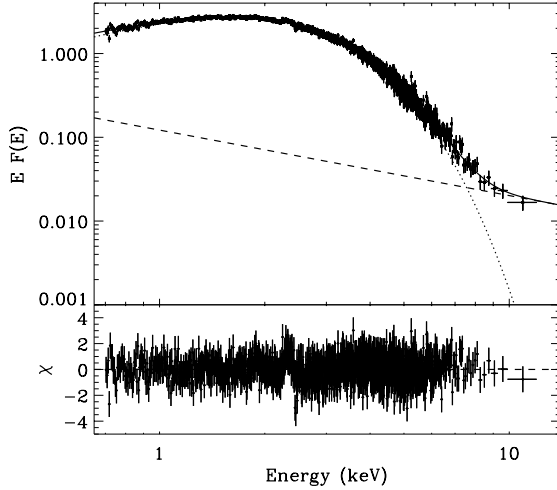
We have applied the same absorbed MCD plus a power law model to a simultaneous fit of the RXTE/PCA,

Table 2. XTE J1720-318 best-fit spectral parameters (with 90% confidence level errors) for the XMM-Newton and the RXTE/INTEGRAL ToOs of February.

Satellite	Date (2003)	Photon index	Disc tempe- rature (keV)	Disc norma- lisation ^a	χ^2_{red} (d.o.f.)	Flux ^b ($\times 10^{-9}$ erg cm ⁻² s ⁻¹)
XMM-Newton	02/20	2.81 ^{+0.60} _{-0.66}	0.67 \pm 0.01	1855 ⁺³⁷ ₋₄₃	0.84 (1062)	2.36
RXTE+INTEGRAL	02/28–03/02	2.72 ^{+0.29} _{-0.34}	0.59 \pm 0.01	5647 ⁺³³⁸ ₋₄₀₄	0.97 (72)	3.25

Notes: ^a Disc normalisation K is given by $K = (\frac{R}{D})^2 \times \cos \theta$ where R is the inner disc radius in units of km, D is the distance to the source in units of 10 kpc and θ the inclination angle of the disc.

^b Unabsorbed 2–100 keV flux.

**Fig. 5.** XMM-Newton/EPIC-PN unabsorbed EF(E) spectrum of XTE J1720-318 (units keV cm⁻² s⁻¹) along with the best-fit model MCD plus power law. Dotted: MCD. Dashed: power law. Thick: total model. Residuals (in σ units) are also shown.

INTEGRAL/JEM-X and INTEGRAL/IBIS data taken about 8 days later. We obtained the best-fit parameters reported in Table 2. To account for uncertainties in relative instruments calibrations, we let a multiplicative constant free to vary in the fit of the different data sets. Taking the RXTE/PCA spectrum as the reference, the derived constants are all found very close to 1 for each instrument. As RXTE and JEM-X are not suited to determine interstellar absorption (energy lower boundary is ~ 3 keV), we fixed N_H to the value obtained from the XMM-Newton fits. We also added a gaussian function at the iron fluorescent line energies to account for a feature present in the RXTE data. The line centroid was found to be $6.45^{+0.16}_{-0.35}$ keV with an equivalent width (EW) of 572^{+307}_{-178} eV. However, this line was not present in the data obtained with XMM-Newton. To check the reality of this line, we reformed the fit of the EPIC PN spectrum by adding to the best fit continuum model an iron line at a fixed energy and width equal to the ones found from the RXTE data ($FWHM = 1.6$ keV). We obtained an upper limit for such a line of 250 eV EW at the 90% confidence level. For a narrow line at the same energy, we obtained an upper limit of 75 eV EW. This upper limit suggests that the line seen with RXTE is probably due to an incorrect background subtraction and not to XTE J1720-318. Indeed a contamination by the galactic ridge emission (Revnivtsev 2003) cannot be excluded even if the line should be rather

centered at 6.7 with a narrower width. With a line centroid fixed to this energy, we obtained from the RXTE spectrum a line width of $0.59^{+0.06}_{-0.21}$ keV and EW of 456^{+117}_{-136} eV. The residuals are slightly worse around the 6.4–6.7 range but they do not exclude such a line contamination. Detailed analysis of other RXTE/PCA data of XTE J1720-318 during the outburst will probably clarify this issue. For this reason, we did not included the line for the fit of the INTEGRAL data. In spite of the low significance level of the detection, the IBIS/ISGRI data allow us to study the source up to higher energies because of the higher sensitivity of ISGRI and the longer exposure time. The 3–200 keV count spectrum and the derived best-fit model are shown in Fig. 6. Figure 7 (red) shows the unfolded EF(E) spectrum with its best-fit model. Note that above ~ 100 keV, the source is not significantly detected.

The disc inner radius (with the same assumptions on distance and viewing angle as above) is 85^{+2}_{-4} km and the disc flux luminosity contributes to 93% of the unabsorbed 2–100 keV luminosity. Indeed, there is a slight evolution between the XMM-Newton derived disc parameters (radius and temperature) and the same parameters found one week later by RXTE and INTEGRAL while the power law slope did not change. According to the strengths of the soft component and the value of the power law photon index, we found that the source was clearly in a HSS, where the thermal component from the accretion disc dominates and the high energy tail is very weak. We have also fitted the data with a bulk motion comptonisation model (Shrader & Titarchuk 1999), often used to model the spectra of BH in HSS. The test gave us an acceptable fit with χ^2_{ν} of 1.36 for 78 d.o.f. The derived temperature of thermal photon source is 0.52 ± 0.01 keV, the energy spectral index $1.8^{+0.2}_{-0.4}$ and the log A parameter $-1.6^{+0.1}_{-0.2}$, compatible with the parameters obtained from the MCD plus power law fit. The spectra taken during the last week of 2003 February are therefore all consistent with the hypothesis that XTE J1720-318 is a BH XN in HSS.

3.3.2. The low/hard state spectrum

As discussed above, IBIS data from rev. 55 to 63, during the hard flare, are consistent with one another (i.e. no variation of HR) and can be summed to derive the average spectrum and its best-fit model reported in Fig. 7 (blue). We fitted this spectrum with a simple power law model between 20 and 600 keV. We also used the count spectrum derived from SPI data of rev. 58 to 61 in order to make a simultaneous fit. Due to the

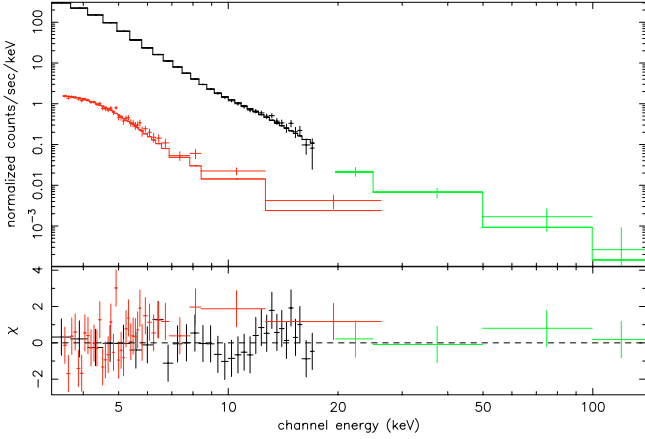


Fig. 6. Joint RXTE/PCA (black), INTEGRAL/JEMX-2 (red) and INTEGRAL/IBIS (green) spectra of XTE J1720-318 during the observations of end 2003 February. The best-fit model, an absorbed MCD plus a power law, is over plotted as a solid line to the data. Residuals (in σ units) are also shown.

presence of high background structures, SPI data from rev. 62 to 63 were not included in the spectra. The SPI data points were binned so as to have a level of 3σ per bin or 4 bins together at least. To account for uncertainties in relative instruments calibrations, we let a multiplicative constant vary in the fit. Taking the IBIS spectrum as the reference (constant equal to 1), the multiplication factor returned for SPI during the fit is 1.28. At 90% confidence level, the best-fit photon index returned from the fits is 1.9 ± 0.1 with a reduced χ^2 of 1.60 (22 d.o.f.), which reveals that the spectrum of XTE J1720-318 is much harder than observed in February. In addition to the power law model, we fitted the data set with a comptonisation model (Sunyaev & Titarchuk 1980): the XSPEC *compst* model. The derived parameters are 43^{+32}_{-11} keV for the temperature and 2.7 ± 0.9 for the optical depth, with a reduced χ^2 of 1.27 (21 d.o.f.). Similarly we fitted the spectrum with a comptonisation model (the XSPEC *comptt* model) which includes relativistic effects, estimates a larger range of parameters and includes the seed soft photon energy (Titarchuk 1994). We obtained, with a seed photon temperature frozen to $kT_{bb} = 0.6$ keV and a spherical geometry, a plasma temperature of $kT = 57 \pm 29$ keV and an optical depth $\tau = 2 \pm 1$ with a reduced χ^2 of 1.19 (21 d.o.f.). We also tested the Putanen & Svensson (1996) comptonisation model (the XSPEC *compps* model) proper for very hot plasmas: we obtained $kT = 430 \pm 110$ keV and τ equal to 0.11 ± 0.11 , for a fixed seed photon $kT_{bb} = 0.45$, with a reduced χ^2 of 1.33. Since the latter models gave slightly better fit than the single power law, we have performed an additional test to see if a break in the power law would be statistically significant. We fitted a cut-off power law and derived the difference between the absolute χ^2 with the χ^2 of the single power law. We restricted the fit to the data up to 300 keV to avoid the use of upper limits, and we obtained a $\Delta\chi^2$ of 5.8; for a χ^2 distribution with 1 d.o.f., this value represents a probability of 95% that the new component is significant. Even if the test is not fully conclusive, a cut-off in the model with a typical folding energy of approximately 120 keV clearly improves the fit and better describes the available data. We note that the derived thermal

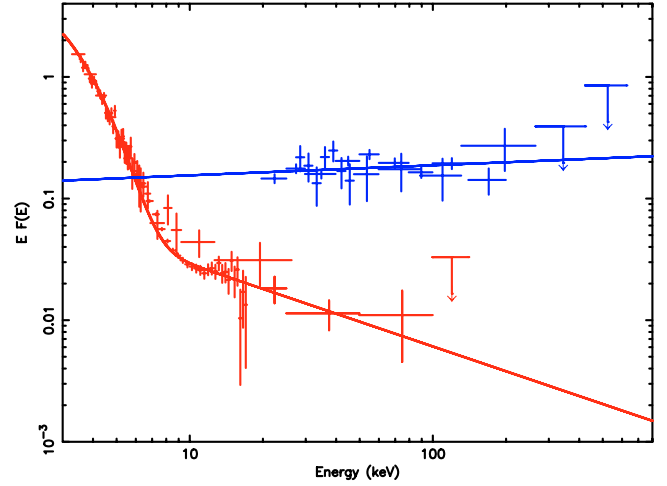


Fig. 7. Unabsorbed $EF(E)$ spectrum of XTE J1720-318 (units of $\text{keV cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) along with the best-fit model: MCD plus power law for the HSS (red) and a power law for the LHS (blue) with IBIS/ISGRI and SPI 20–600 keV data (rev. 55 to 63). Upper limits are shown at 3σ .

comptonisation parameters for XTE J1720-318 during the hard flare (or the best-fit power law index and cut-off energy) are very much consistent with those found in BHB in the so-called LHS.

4. Discussion

The high equivalent absorption column density derived from the XMM-Newton data suggests that XTE J1720-318 lies at the GC distance or even further. This would place the source in the galactic bulge and we will, therefore, assume a distance to the source of 8 kpc.

When observed with XMM-Newton, about 40 days after the outburst peak, XTE J1720-318 was clearly in a HSS, characterized by a strong soft (thermal) component, well modelled by a MCD model with an inner disc temperature of $kT \sim 0.7$ keV, and a weak power law tail (Fig. 5). The source was found in HSS also at the end of February (Figs. 6 and 7) when we could measure, with higher precision, using INTEGRAL and RXTE simultaneous observations, the power law index of 2.7. In both observations, the disc component accounted for more than 85% of the unabsorbed 2–100 keV source luminosity, estimated at the end of February at $2.5 \times 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$. We estimated the bolometric luminosity from the best fit spectrum by extending the flux computation at 0.01 keV. We obtained for the XMM observation a value of $1.4 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$. Even for a small $5 M_{\odot}$ BH (see discussion below), this bolometric luminosity is below the Eddington luminosity which is $6.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ for such a BH mass. Similar results are obtained one week later with RXTE/INTEGRAL observations: the accretion rate is sub-Eddington.

Besides, no line emission was observed with XMM-Newton and we could determine an upper limit to the EW of 75 and 144 eV for narrow lines at 6.4 and 6.7 keV respectively. The upper limits for broad lines are less constraining. As discussed in Sect. 3.3.1, we consider unlikely that the relatively strong iron line (~ 570 eV) we detected with RXTE

about 10 days later can be due to the source since we obtained an upper limit of 250 eV with XMM data and we did not observe large spectral changes between the two observations. The XMM-Newton narrow line upper limit is below the strong EWs (>150 eV) of lines observed in certain BH systems and attributed to fluorescence produced by reflection of hard X-rays from the accretion disc (e.g. Miller et al. 2001).

However, these line are often broadened by relativistic effects and in this case our data are less constraining. For the parameters of the emission line (centroid at 6.2 keV and *FWHM* of 2.4 keV) reported by Markwardt (2003) from an RXTE observation of XTE J1720-318 performed during the main outburst peak, we in fact obtained upper limits of only 290 eV, while the RXTE measured EW was 95 eV. Only slight differences in the spectral parameters of the soft component were measured between the INTEGRAL/RXTE observations and the XMM-Newton one (i.e. a lower temperature and a larger inner disc radius). The inner radius derived from the normalisation of the MCD model for XTE J1720-318 (for the assumed distance and inclination angle) is compatible with values of the radius of the innermost stable circular orbit around a Schwarzschild BH with mass of $\sim 5 M_{\odot}$. During the outburst decay of BH XN, this parameter is observed to remain approximately constant if the source stays in the HSS (McClintock & Remillard 2003; Ebisawa et al. 1991). The variation observed in XTE J1720-318 could indicate that the disc was receding during the decay phase, but it is more probably linked to a specific variation of the normalisation during a secondary flare. Indeed the XMM-Newton observation took place right at the maximum of a weak secondary peak which occurred in the decay phase (see Fig. 1, top panel) and which was also observed in infrared (Nagata et al. 2003). In anycase, these differences could also be due at least in part to cross calibration uncertainties between the instruments. The lack of significant rapid variability that we have found from the study of the PDS using RXTE data, is also compatible with the source being in the HSS. In this state in fact, the fractional time variability is in general lower than 5–10%. From our data, considering the results previously reported by Markwardt et al. (2003) and the RXTE/ASM light curve which steadily decreased during 2003, we can conclude that the source did not change spectral state during the decay phase which started after the main outburst peak and lasted until about mid March.

A dramatic change in the source behaviour was instead observed with INTEGRAL towards the end of March. After the source had decreased below the INTEGRAL detection level, we observed the rise of the high-energy component about 75 days after the main outburst peak, giving rise to a secondary outburst which we could observe for about 25 days. Since such increase was not seen in the RXTE/ASM count rate, and as we did not have significant signal in the JEM-X data, we conclude that the source underwent a spectral transition towards the LHS. The 20–200 keV unabsorbed luminosity increased in about 10 days from below the INTEGRAL detection level to a value of 7×10^{36} erg s $^{-1}$. Then it started to decrease with timescale between 10 days and 50 days.

During this secondary outburst, the >20 keV spectrum was hard and well described by a power law photon index of 1.9 or

a thermal comptonisation model with a (weakly constrained) plasma temperature of 43 keV and an optical depth of 2.7. The spectral break seems probable, but no firm conclusion is possible due to the low significance of the derived source spectrum at high energies. The derived best-fit parameters (both the power law slope and break and the temperature and depth of the comptonising plasma) are however compatible with those typically found in BHB in the LHS. Assuming that the power law extends at low energies without any additional contribution of a soft component, we estimated an average unabsorbed 2–200 keV luminosity of $\sim 9.4 \times 10^{36}$ erg s $^{-1}$. The bolometric luminosity is estimated to 4.3×10^{37} erg s $^{-1}$ and shows again that the source was in a sub-Eddington regime, even for a low mass BH. While this secondary outburst did not reach the luminosity of the main one, it is clear that the transition is not simply due to spectral pivoting as observed in Cygnus X-1.

The high peak luminosity, the fast rise and slow decay time scales, the HSS and the secondary outburst with transition to a LHS with spectral parameters typically observed in other (dynamically confirmed) BH transients, like e.g. XTE J1550-564 (Sobczak et al. 2000; Rodriguez et al. 2003) or GRO J1655-40 (Sobczak et al. 1999, see also McClintock & Remillard 2003), clearly show that XTE J1720-318 is very likely a new XN and BHC, possibly located in the galactic bulge.

Although there is little doubt about the origin of the soft thermal component and its modelling, the interpretation of the high-energy tail and its connection to the spectral states remain rather controversial. In the HSS, most of the X-rays are radiated by the accretion disc which is supposed to extend down very close to the BH horizon. The standard Shakura & Sunyaev (1973) α -disc, however, cannot produce hard radiation (in either of the spectral states). In the LHS, the disc component is weak or absent and, when observed, the fitted temperature is very low and the inner radius very large. In this state, the accretion disc is supposed to be truncated at a large radius. The hard component is generally attributed to thermal comptonisation of the disc soft radiation by a hot corona (Sunyaev & Titarchuk 1980; Titarchuk 1994) located above the disc or in the inner part of the system, around and very close to the BH. Thermal comptonisation models fit well the spectra during the LHS and indeed the comptonisation parameters derived for XTE J1720-318 are in good agreement with those usually observed in BH systems in LHS. However, the details of the geometry and of radiation mechanisms at work are still not understood; the processes which lead to the spectral transition and the possible role of non-thermal (synchrotron) radiation are still very uncertain. For example, one set of models which explain the above geometry and the comptonisation origin of the hard emission in LHS are those based on Advection Dominated Accretion Flows (ADAF). They are hot radiatively inefficient flows where most of the energy is advected into the BH (Esin et al. 1998). During LHS, the ADAF takes place between the truncated inner disc and the BH horizon, and gives rise to a hot optically thin plasma responsible for the thermal comptonisation of the disc photons.

However, in the recent years, it has become apparent that in LHS, the BHB become bright in radio and display a clear correlation between the X and radio luminosities

(see Fender et al. 2003). Observations of XTE J1720-318 with the ATCA radio telescope have shown that this source was bright at radio wavelengths during the secondary outburst (Brocksopp et al. 2004, in preparation), when we clearly saw the source in the LHS. Simple ADAF models have difficulty to explain such correlations. Models where a compact jet at the base of the BH plays a major role in the physical processes of such systems have been proposed (Markoff et al. 2001). In jet models of BHB, the high-energy emission seen during the LHS is interpreted as synchrotron emission from the jets which extends from radio to hard X-ray, naturally explaining the correlations observed during the LHS.

Besides, the high energy tail observed in HSS or in the intermediate states is not fully understood. The observed steep power law (index ~ 2.7) without significance of a break could also be related to the presence of a non-thermal component in the accretion flow which has been proposed in the so-called hybrid thermal/non-thermal models (Zdziarski et al. 2001; Poutanen & Coppi 1998). Alternatively, comptonisation on a population of (thermalised) electrons with bulk motion (e.g. Titarchuk et al. 1997; Laurent & Titarchuk 1999) may be responsible for this component. The fit of XTE J1720-318 HSS spectrum we performed with the BMC model does provide parameters similar to those obtained in other BHB (Borozdin et al. 1999). However, the XTE J1720-318 spectrum is significant only up to about 80 keV so we cannot test the predicted presence of a high-energy break expected at energies greater than 200 keV.

Thanks to the imaging capability and sensitivity of INTEGRAL, it has been possible to study a faint transient source in the galactic bulge, to detect a secondary outburst in hard X-rays, typical of XN, and a spectral transition confirming the probable BH nature of the object and to obtain a significant spectrum up to 200 keV. The detection and study of the other XN of the galactic bulge with INTEGRAL will possibly provide more data on this kind of objects and will thus improve our understanding of the physics of BHB.

Acknowledgements. M.C.B. thanks J. Paul and P. Ferrando for careful reading and commenting the manuscript. JR acknowledges financial support from the French Space Agency (CNES). We thank Brocksopp et al. for providing a preprint of their paper in preparation. We thank the ESA ISOC and MOC teams for they support in scheduling and operating the ToO observations of XTE J1720-318. The present work is based on observations with INTEGRAL, an ESA project with instruments and science data centre funded by ESA member states (especially the PI countries: Denmark, France, Germany, Italy, Switzerland, Spain, Czech Republic and Poland, and with the participation of Russia and the USA) and with XMM-Newton, an ESA science mission with instruments and contributions directly funded by ESA member states and the USA (NASA).

References

- Arnaud, K. A. 1996, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, ed. G. H. Jacoby, & J. Barnes (San Francisco: ASP), ASP Conf. Ser., 101, 17
- Borozdin, K., Revnivtsev, M., Trudolyubov, S., et al. 1999, *ApJ*, 517, 367
- Brocksopp, C., Corbel, S., Fender, R. P., et al. 2004, in preparation
- Courvoisier, T. J.-L., Walter, R., Beckmann, V., et al. 2003, *A&A*, 411, L53
- Ebisawa, K., Ogawa, M., Aoki, T., et al. 1994, *PASJ*, 41, 375
- Esin, A. A., Narayan, R., Cui, W., et al. 1998, *ApJ*, 505, 854
- Fender, R. P., Gallo, E., & Jonker, P. G. 2003, *MNRAS*, 343, L99
- Goldoni, P., Goldwurm, A., Kuulkers, E., et al. 2003, *Atel*, 153
- Goldwurm, A., David, P., Foschini, L., et al. 2003, *A&A*, 411, L223
- Gonzalez-Riestra, R., Rodriguez-Pascual, P. M., Santo-Lleo, M., et al. 2003, *IAUC*, 8080
- Gros, A., Goldwurm, A., Cadolle Bel, M., et al. 2003, *A&A*, 411, L179
- Guainazzi, M., *XMM-Newton Science Analysis Workshop 2001*, WA3
- Knödseder, J. 2004, 5th INTEGRAL Workshop, to be published
- Laurent, P., & Titarchuk, L. 1999, *ApJ*, 511, 289
- Lebrun, F., Leray, J. P., Lavocat, P., et al. 2003, *A&A*, 411, L141
- Lund, N., Budtz-Jorgensen, C., Westergaard, N. J. et al. 2003, *A&A*, 411, L231
- McClintock, J. E., & Remillard, R. E. 2003
[arXiv:astro-ph/0306213]
- Markoff, S., Flacke, H., & Fender, R. 2001, *A&A*, 372, L25
- Markwardt, C. B. 2003, *Atel*, 115
- Mas-Hesse, J. M., Giménez, A., Culhane, J. L., et al. 2003, *A&A*, 411, L261
- Miller, J. M., Fabian, A. C., & Wijnand, R. 2002, *ApJ*, 570, L69
- Mitsuda, K., Inoue, H., Koyama, K., et al. 1984, *PASJ*, 36, 741
- Nagata, T., Kato, D., Baba, D., et al. 2003, *PASJ*, to appear
[arXiv:astro-ph/0312012]
- O'Brien, K., Clarke, F., Fender, R. P., et al. 2003, *Atel*, 117
- Parmar, A. N., Kuulkers, E., Oosterbroek, T., et al. 2003, *A&A*, 411, L421
- Poutanen, J., & Coppi, P. 1998, *Phys. Scr.*, 77, 57
[arXiv:astro-ph/9711316]
- Poutanen, J., & Svensson, R. 1996, *ApJ*, 410, 249
- Remillard, R. E., Levine, A. M., Morgan, E. H., et al. 2003, *IAUC*, 8050
- Revnivtsev, M. 2003, *A&A*, 410, 865
- Rodriguez, J., Corbel, S., & Tomsick, J. A. 2003, *ApJ*, 595, 1032
- Rupen, M. P., Brocksopp, C., Mioduszewski, A. J., et al. 2003, *IAUC*, 8054
- Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, *A&A*, 24, 373
- Shrader, C., & Titarchuk, L. 1999, *ApJ*, 521, L21
- Sobczak, G. J., McClintock, J. E., & Remillard, R. R. 1999, *ApJ*, 520, 776
- Sobczak, G. J., McClintock, J. E., & Remillard, R. R. 2000, *ApJ*, 544, 993
- Skinner, G., & Connell, P. 2003, *A&A*, 411, L123
- Sunyaev, R. A., & Titarchuk, L. 1980, *A&A*, 86, 21
- Tanaka, Y., & Lewin, W. H. G. 1995, in *X-ray Binaries*, ed. W. H. G. Lewin, J. van Paradijs, & E. P. J. van der Heuvel (Cambridge University Press), 126
- Tanaka, Y., & Shibasaki, N. 1996, *ARA&A*, 34, 607
- Titarchuk, L. 1994, *ApJ*, 434, 570
- Titarchuk, L., Mastichiadis, A., & Kylafis, N. D. 1997, *ApJ*, 487, 834
- Ubertini, P., Lebrun, F., Di Cocco, G., et al. 2003, *A&A*, 411, L131
- Winkler, C. 2001, in *Exploring the Gamma-Ray Universe*, Proceedings of the Fourth INTEGRAL Workshop, ESA SP-459, 471
- Winkler, C., Courvoisier, T. J.-L., Di Cocco, G., et al. 2003, *A&A*, 411, L1
- Vedrenne, G., Roques, J.-P., Schönfelder, V., et al. 2003, *A&A*, 411, L63
- Zdziarski, A. A., Grove, J. E., Poutanen, J., et al. 2001, *ApJ*, 554, L45

4. Le trou noir au centre de la Galaxie

La région du centre galactique (les 600 pc centraux de la Galaxie), est extrêmement riche et dense d'objets, de matière interstellaire et de champs électromagnétiques interagissant entre eux. Il représente un site privilégié, bien que complexe, pour l'étude de plusieurs phénomènes physiques, notamment dans le domaine des hautes énergies. Il est souvent considéré comme un véritable laboratoire pour l'astrophysique moderne (voir par exemple les revues de Mezger et al. 1996, Morris & Serabyn 1996, Melia & Falcke 2001) et il fait de plus en plus l'objet de campagnes d'observation à toutes longueurs d'onde.

Centre du potentiel gravitationnel et du champ de vitesse galactique, sa structure et sa dynamique sont dominées à grande échelle par la composante stellaire, à moyenne échelle par les nuages moléculaires denses, le gaz ionisé et les champs magnétiques et à échelle plus petite par un trou noir massif de quelques millions de masses solaires (M_{\odot}). En effet la présence d'un trou noir supermassif de $3 - 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ au noyau galactique est désormais prouvée par l'observation dans l'infrarouge (IR) des mouvements propres d'étoiles proches du centre.

Le trou noir au centre de la Galaxie est évidemment une cible prioritaire des programmes de recherche sur les trous noirs puisqu'il représente le spécimen supermassif le plus proche de nous, donc en principe le plus facile à observer. D'abord, sa proximité nous permet d'étudier en détail les caractéristiques de la région qui l'entoure et puisqu'un trou noir est visible seulement grâce à ses effets sur la matière et le rayonnement environnant, cette opportunité est essentielle. Les échelles temporelles des phénomènes qui se déroulent autour d'un trou noir dépendent de sa masse : plus la masse est grande et plus les échelles de temps sont longues. Pour des trous noirs de masse stellaire, le temps dynamique est de l'ordre de la milliseconde, pour un trou noir un million de fois plus massif ces sont des temps typiques de 1000 s qui sont en jeux. Le flux ($\sim 10^3$ à 10^4 plus faible que pour les trous noirs dans les systèmes binaires X) par unité de ce temps est alors plus grand que pour les trous noirs de masse stellaire et le type d'information physique que nous pouvons extraire des observations X est supérieur.

De surcroît le trou noir du centre galactique relie les études sur les trous noirs de masse stellaire à ceux des noyaux des galaxies (actives ou pas). Nous savons désormais que presque toutes les galaxies abritent un trou noir massif central et beaucoup d'entre eux sont aussi peu actifs que le trou noir du centre galactique. D'autre part les noyaux actifs de galaxies (*active galactic nuclei*, AGN) avec leur trou noir de $10^7 - 10^9 M_{\odot}$ et des luminosités de l'ordre de $10^{42} - 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ sont parmi les objets les plus énergétiques du cosmos. La machine à l'origine de la puissance des AGN est, bien sûr, l'accrétion de matière dont nous voulons comprendre les mécanismes physiques.

Comme nous avons vu dans l'introduction, un trou noir qui accrete de la matière émet la majeure partie de sa luminosité dans le domaine des hautes énergies. Toutes les expériences à haute énergie ont donc dans leur programme l'observation des régions centrales de la Galaxie.

La compréhension des phénomènes qu'on observe dans cette région, ne peut pourtant pas se faire, en raison de sa complexité, qu'avec une vision relativement complète des données observationnelles dans les autres longueurs d'onde. Avant de présenter les résultats du programme haute énergie que j'ai développé, je recenserais donc les caractéristiques des régions centrales de la Galaxie (section 4.1) et de la source Sgr A^{*} (section 4.2) considéré depuis sa découverte comme la manifestation radiative du trou noir central de notre Galaxie. Ces brèves introductions au sujet du centre galactique s'appuieront sur les illustrations de la publication n°. 8 (Goldwurm 2001), à laquelle je renvoie le lecteur pour plus de détails.

Je présenterais ensuite le programme de recherche que j'ai initié et que je dirige actuellement pour la recherche d'émission X et gamma du trou noir central de la Galaxie et l'étude de la région du centre galactique dans le domaine des hautes énergies. Ce programme a commencé avec les observations SIGMA (section 4.3) a été poursuivi avec la préparation (section 4.4) et la réalisation des observations XMM-Newton (section 4.5) et d'INTEGRAL (section 4.6 et 4.7) couplées à des programmes multi longueurs d'onde (section 4.8). Pour les perspectives futures, voir le chapitre 5.

4.1 Un laboratoire pour l'astrophysique des hautes énergies

Depuis déjà les années 1915 à 1930 les astronomes avaient bien remarqué que les étoiles tournent autour d'un point du ciel situé dans l'hémisphère austral vers la constellation du Sagittaire, au milieu (mais dans une région sombre) de la Voie Lactée. Ils avaient aussi noté que les amas globulaires sont distribués avec une symétrie sphérique autour de ce même point. Nous savons maintenant que le centre dynamique et de symétrie de la Galaxie est effectivement situé dans le Sagittaire à environ 8 kpc du soleil.

Notre Galaxie est une galaxie de type spirale barrée (Sbc – SBbc), formée d'un disque où apparaissent 4 bras spiraux. Le diamètre du disque est de 30 kpc, son épaisseur de 400 pc et sa masse de $10^{11} M_{\odot}$ (dont 90% de nature stellaire). Le disque est immergé dans un halo étendu (50 kpc ou plus) de vieilles étoiles et de matière noire. Un bulbe elliptique occupe le 6 kpc centraux. Étoiles jeunes, gaz et poussières interstellaires sont concentrés dans les bras, et la distribution du gaz moléculaire (H_2) présente un pic de densité dans un anneau à 4 kpc du centre, l'anneau moléculaire. Le soleil se situe dans le plan du disque galactique, dans une région périphérique, le bras d'Orion (une branche du grand bras spiral externe de Persée). Le soleil tourne autour du centre galactique dans le sens de la rotation galactique à 200 km s^{-1} avec une période galactique de 220 millions d'années.

Vue du soleil, le centre de la Galaxie est donc complètement obscurci par la poussière et le gaz du disque galactique, avec un coefficient d'absorption dans le visible (A_V) de l'ordre de 30 mag, équivalente à une densité de colonne de $N_H = 6 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. Pour cette raison, l'étude de cette région n'a pu débuter qu'à la fin des années 1930 quand la radioastronomie a fait son apparition. Si les rayonnements visibles, ultraviolets (UV) et X mous ($< 1\text{-}2 \text{ keV}$) sont complètement absorbés, on peut observer le centre galactique dans les fréquences radio jusqu'à l'infrarouge proche ($2 \mu\text{m}$) ainsi qu'aux hautes énergies (rayons X et gamma). Pour toutes ces raisons, le centre galactique est une cible prioritaire des instruments opérant à haute énergie.

Les images infrarouges (comme celles de COBE) montrent que le bulbe galactique est formé d'un énorme amas d'étoiles vieilles (5-10 Gy) de basses et moyenne masses et de métallicité $\sim 1\text{-}2$ dont la densité augmente comme $\sim 1/r^2$ avec la distance r du centre, jusqu'à un rayon critique de $\sim 0.1 \text{ pc}$

où la densité atteint une valeur constante de $\sim 10^7 \text{ M}_\odot/\text{pc}^3$. Cette composante domine la dynamique de la région jusqu'à des rayons internes de 1-2 pc. Les observations IR montrent aussi la présence de poussière associée aux nuages moléculaires ainsi qu'une composante stellaire beaucoup plus jeune. En effet, plusieurs régions de formations d'étoiles sont visibles dans le centre galactique avec des amas d'étoiles massives, chaudes et jeunes qui ionisent le gaz et forment des régions HII brillantes en radio (continuum thermique et raies de recombinaison).

C'est donc en radio que la complexité et la richesse des régions centrales de la Galaxie sont bien mises en évidence. La carte la plus spectaculaire de la région est sans doute celle des quatre degrés centraux (environs 600 pc) obtenue par les observations du VLA à 90 cm (La Rosa et al. 2000) (Fig. 4.1, gauche/haut). On y observe des nuages moléculaires géants (Sgr B2, Sgr C), plusieurs restes de supernova (SNR) avec leur coquilles non thermiques en expansion (G 09+09, G 359-04), des structures thermiques identifiées comme des régions HII (Pistol, Seiklo) ionisées par des amas d'étoiles jeunes (Arches, Quinuplet). Des structures à filaments non thermiques (comme la longue structure courbe et perpendiculaire au plan galactique, appelée l'Arc Radio) montrent la présence de particules accélérées et de champs magnétiques. Les champs magnétiques ont des intensités (1-2 mG) nettement plus importantes que dans le reste du plan galactique ($\sim 10 \mu\text{G}$) et semblent s'aligner perpendiculairement au plan entre les nuages, parallèlement au plan dans les nuages. Les nuages denses du centre galactique contiennent à eux seuls $\sim 10\%$ de l'ensemble du gaz moléculaire galactique. Avec des densités typiques de l'ordre de $10^4\text{-}10^5 \text{ cm}^{-3}$ et des températures $T \sim 20\text{-}300 \text{ K}$, ce sont bien évidemment des sources de formation d'étoiles et des cibles pour le rayons cosmiques.

Le 50 pc centraux sont dominés par le complexe radio moléculaire Sgr A (Fig. 4.1, droite/haut). Cet ensemble comprend par plusieurs nuages moléculaires (M-013-018, M-002-007), une source non thermique appelée Sgr A East (Fig. 4.1 gauche/bas), une source thermique diffuse avec un structure interne à spirale (Sgr A West, Fig. 4.1 droite/bas), entourée d'un anneau de gaz moléculaire et de poussières (le *circumnuclear disk*, CND). Sgr A West est ionisée par un ensemble d'étoiles très lumineuses, chaudes et jeunes présentes dans le pc central. Cet amas d'étoiles, nommées IRS16 du nom de la source infrarouge trouvée à sa position, est centré à seulement 2" du véritable centre galactique (marqué par la source Sgr A^{*}). Il contient aussi des étoiles post séquence principale, qui apparaissent comme des étoiles Wolf Rayet, des étoiles avec des raies d'émission de l'hélium. Ces étoiles émettent des vents stellaires très puissants, dont la pression couplée à la pression de radiation UV, repousse le gaz et les poussières en créant une cavité relativement vide de matière.

Sgr A East est une structure diffuse non thermique de forme presque triangulaire et dimension de 8' (~ 20 pc) à l'intérieur de laquelle on observe un coquille (*shell*) elliptique de $2' \times 3'$ ($5 \text{ pc} \times 7 \text{ pc}$) dont le centre est localisé à $\sim 50''$ (2 pc) de Sgr A* (Fig. 4.1 gauche/bas). Cette *shell* est clairement en expansion car elle interagit avec M-0.02-0.07. Les régions HII compactes et les sources masers (OH) que l'on observe à la limite de la *shell* de Sgr A East sont une manifestation de cette interaction. A partir des données radio et de ces estimations sur l'expansion on avait identifié cette source avec un vestige de supernova mais on avait évalué l'énergie de l'explosion initiale à quelque $10^{52} \text{ erg s}^{-1}$. Pour expliquer une telle énergie, on avait avancé l'hypothèse que Sgr A East est le résultat de l'explosion de plusieurs dizaines de supernovas ou de la dislocation explosive d'une étoile par les forces de marée du trou noir massif. Les mesures X récentes (Chandra et XMM-Newton) ont démontré que Sgr A East est un SNR à la morphologie mixte (*shell* radio et émission X thermique à l'intérieur) avec une énergie mécanique de $10^{49} \text{ erg s}^{-1}$, et donc relativement normale pour une explosion de supernova. Toutefois, son spectre radio est relativement plat et légèrement atypique pour les SNR à *shell*, avec une pente de 1.1 (en F_ν), et il se développe certainement dans un milieu très dense. Ces caractéristiques et sa position particulière impliquent que, probablement, il joue un rôle important dans l'émission de haute énergie observée dans le centre galactique.

La minispirale de Sgr A West et le CND sont en interaction entre eux et en rotation autour du même point. Les vitesses mesurées montrent que si ce mouvement est d'origine purement gravitationnelle, la masse qui gouverne la dynamique doit être de quelques $10^6 M_\odot$. Au centre dynamique de Sgr A West réside une source radio compacte, brillante et variable, appelée Sgr A* (Fig. 4.1 droite/bas).

4.2 Sgr A* : le trou noir supermassif du centre galactique

Sgr A* fut découverte il y a 30 ans par Balick & Brown (1974) après que sa présence, comme manifestation radio d'un trou noir massif, eut été prédites par Lynden-Bell & Rees en 1971. Cette source intense ($\sim 1 \text{ Jy}$) de rayonnement non thermique présente des caractéristiques tout à fait extraordinaires par rapport à d'autres sources radio galactiques. Elle est compacte, variable avec un spectre plat, voir inversé, typique des sources synchrotron dominées par l'auto absorption.

Le spectre radio (F_ν) moyen (Fig. 4 publication n° 8) est plat avec une pente de $\sim 0,3$ et luminosité totale de $L_R = 1,2 \cdot 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$, mais présente toutefois une sorte de bosse aux fréquences sub millimétriques. Ce changement de pente spectrale à $\sim 300 \text{ GHz}$, associé à l'apparition de

polarisation linéaire (jusqu'à $\sim 10\%$ mais absent à plus basses fréquences) est interprété comme la signature du passage de l'émission de synchrotron vers un régime optiquement mince. En infrarouge proche, l'objet est caractérisé par des émissions transitoires brèves superposées à une très faible émission quiescente. Dans les fréquences IR moyennes et lointaines (MIR et FIR) seule des limites supérieures ont été obtenues.

La source est massive et compacte. Son mouvement propre est inférieur à 20 km s^{-1} . Dans l'hypothèse d'un équilibre dynamique avec les objets voisins, tous animés de vitesses exorbitantes, cette limite implique une masse minimale de l'ordre de $\sim 1000 M_{\odot}$. La mesure de ses dimensions est gênée par la diffusion du milieu interstellaire. Puisque cet effet suit une loi du type $\theta \propto \lambda^2$ (où θ est la dimension angulaire observée et λ la longueur d'onde) les vraies dimensions de la source peuvent être établies qu'avec des mesures VLBI ou VLBA à haute fréquence, donc aux fréquences millimétriques. Les plus récentes mesures à 3,5 mm (Shen et al. 2005) ont permis de déterminer la dimension angulaire intrinsèque de Sgr A*, soit $\sim 0,126$ milli-arcsec (mas). A 8 kpc elle correspond à $1,51 \cdot 10^{13} \text{ cm} = 1,01 \text{ AU}$, soit à $\sim 15 R_S$ pour un trou noir de $3,5 \cdot 10^6 M_{\odot}$.

Mais les mesures que l'on considère aujourd'hui comme donnant la meilleure preuve que cette source est bien un trou noir supermassif ont été obtenues sur une période d'une quinzaine d'années en étudiant les vitesses et les mouvements propres des étoiles de l'amas central (Fig. 4.2 gauche), l'amas d'étoiles compris dans l'arc seconde central et visible en infrarouge proche. Cet amas (appelé souvent amas central ou amas de Sgr A*) semble différent de l'amas IRS16 puisque composé d'étoiles brillantes de type B plutôt que de type O ou de type WR. Les mesures ont été effectuées avec des caméras, qui travaillent dans la bande infrarouge proche (NIR), au foyer des grands télescopes (NTT, VLT, Keck) munis de dispositifs à optique adaptative. Elles ont permis d'établir des diagrammes qui montrent l'évolution de la masse, responsable des vitesses observées, enfermée à l'intérieur d'un certain rayon (Fig. 4.2, droite). En 2002, Schoedel et al. (2002) présentaient les mesures de la camera NACO du VLT qui permirent d'établir les paramètres orbitaux de l'étoile S2 la plus proche de Sgr A*. Avec un période de 15 années, une vitesse de 5000 km s^{-1} et une distance au périastre de seulement 124 AU, l'étoile S2 imposait la masse record de $3,5 \cdot 10^6 M_{\odot}$ contenue à l'intérieur d'un rayon de 17 heures lumière. Aujourd'hui, les meilleurs mesures se basent sur les orbites d'une quinzaine d'étoiles de l'amas central (Fig. 4.2, droite) et imposent un masse sombre de $(3,7 \pm 0,2) \times 10^6 M_{\odot}$ à l'intérieur de 10 AU du centre dynamique (Eisenhauer et

al. 2005, Ghez et al. 2005a). En plus le centre dynamique des orbites des étoiles S coïncide avec la position radio de Sgr A^{*} avec une précision de ± 10 mas.

A moins d'évoquer des objets exotiques (étoiles non baryoniques), une telle concentration de masse ne peut être stable que si elle forme un trou noir. Par la suite, nous ferons l'hypothèse que Sgr A^{*} est bien la manifestation radiative d'un trou noir supermassif de $3,5 \cdot 10^6 M_{\odot}$, dont le rayon de Schwarzschild $R_S = 2GM / c^2$ est $1,05 \cdot 10^{12}$ cm, ou 0.7 AU.

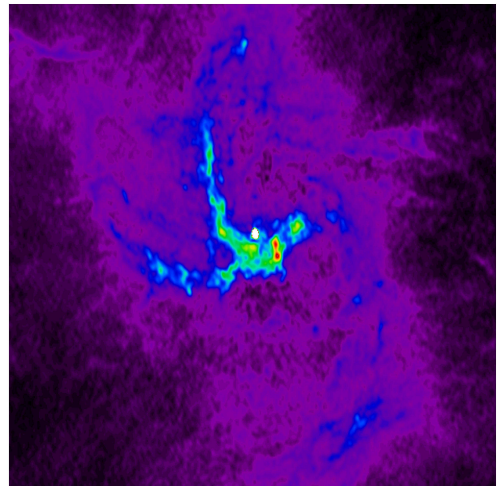
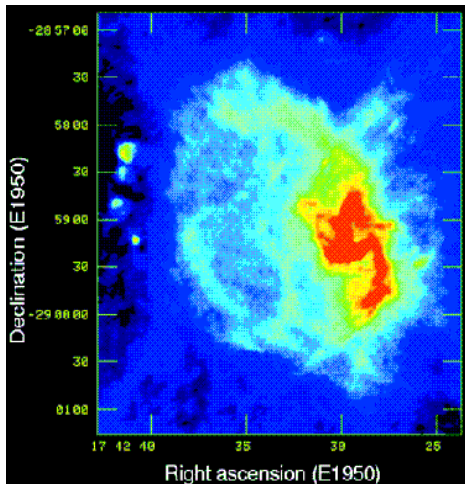
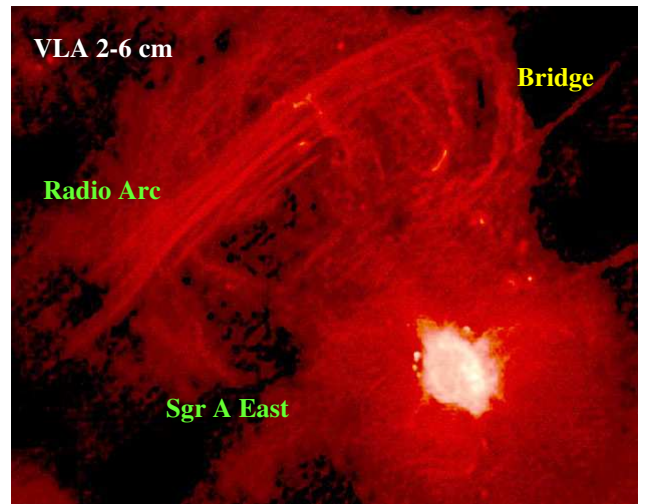
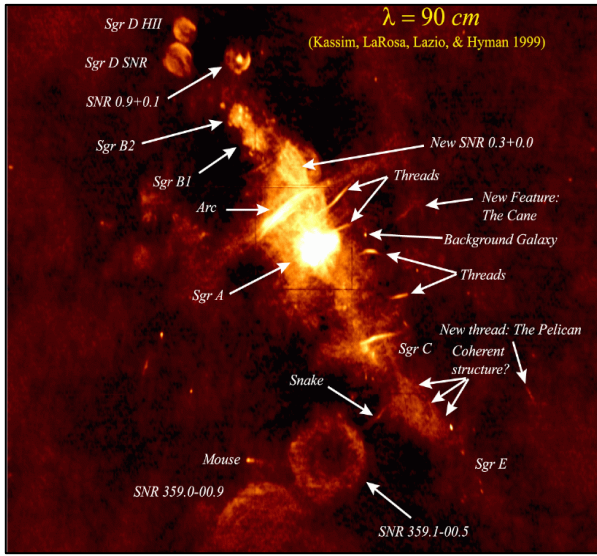


Fig. 4.1 Images radio du centre de la Galaxie. *Haut/gauche* : la région nucléaire vue à 90 cm avec le VLA. *Haut/droit* : le complexe radio moléculaire Sgr A et les structures non thermiques de l'arc radio et thermiques du bridge (VLA à 2 et 6 cm). *Bas/gauche* : Sgr A East avec les régions HII. *Bas/droite* : la minispirale de Sgr A West avec, au centre, Sgr A^{*} (point blanc).

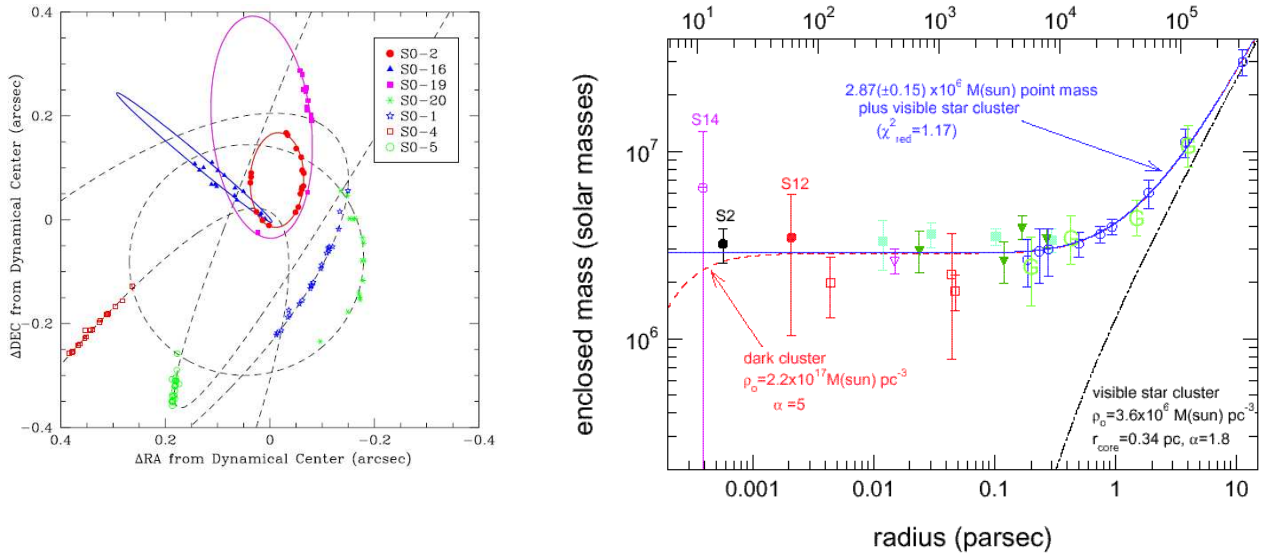


Fig. 4.2 *Gauche* : Orbits des étoiles *S* de l’amas central selon les mesures obtenues avec le Keck (Ghez et al. 2005a). *Droite* : La masse contenue à chaque rayon, mesurée par le mouvement du gaz et des étoiles (Schöedel et al. 2003). Les contraintes les plus fortes sont données par les étoiles *S* de l’amas central.

4.3 Observations SIGMA des régions centrales de la Galaxie

Un tel trou noir est censé être une source puissante de rayonnement X et gamma, pour peu qu’il soit en mesure d’accréter la matière environnante. Et de fait, dès les premières observations X de la région, on détecta une source dans la direction du centre galactique. Toutefois cette source, génériquement appelée GCX et positionnée avec une incertitude de ~ 1 degré, ne pouvait pas clairement être associée à Sgr A, faute de résolution angulaire suffisante. Plusieurs expériences (Ariel 5, HEAO 1, SL 1005) avaient ensuite montré que GCX était en effet composée de plusieurs objets plus faibles dont certains variaient considérablement (et même montraient des sursauts typiques des *bursters* de type I) (voir par exemple Proctor et al. 1978).

L’observatoire Einstein fut le premier à dresser la carte X (X mous) des régions centrales avec des résolutions de l’ordre de la minute d’arc. Watson et al. (1981) découvrirent la présence d’émission diffuse et une douzaine de sources ponctuelles dans le degré central, dont une (1E 1742.5-2859) coïncidant avec Sgr A West et Sgr A^{*}. La faible émission de cette source montra que le trou noir ne

semblait pas capable d'émettre en rayons X mous plus que $\sim 10^{35}$ ergs s⁻¹. Ensuite, entre 1980 et 1990, plusieurs expériences X avaient observé la région. La plus remarquable d'entre elles fut certainement le XRT/SL2, le premier télescope à masque codé lancé dans l'espace, qui fournit des images du centre galactique à énergies entre 3 et 30 keV avec des résolutions de $\sim 3'$ (Skinner et al. 1987). A la position de Sgr A* Skinner et ses collaborateurs détectèrent une source faible qui, une fois comparée à la source Einstein, semblait montrer une variabilité. Dans le domaine d'énergie plus élevée (20-30 keV) la seule source qui présentait de l'émission significative était la source Einstein 1E 1740.7-2942.

Il restait toutefois à déterminer si Sgr A* pouvait être une source de rayons X durs et gamma ($E > 30$ keV). Question très pertinente, puisque les trous noirs dans les systèmes binaires et dans les AGN émettent (dans leur état *low / hard*) le maximum de leur énergie vers 100 keV. De surcroît, HEAO 3 et autres expériences avaient décelé la présence d'une raie fine et variable⁷ à 511 keV, l'énergie de la raie d'annihilation électron positon, vers la direction du centre galactique. Ce type d'émission était considéré comme le signe de la présence du trou noir massif (Genzel & Townes 1987).

Lancé en décembre 1989, SIGMA commença la surveillance du centre galactique dès mars 1990. En 1997, à la fin de la mission, SIGMA avait collecté presque 10^7 s d'observation du centre. Cela a permis de bâtir les images du bulbe et du centre galactique dans les bandes des X durs et des gamma mous les plus précises du XX^{ème} siècle. Dès les premières observations, nous avons pu observer que l'émission à des énergies > 80 keV du centre était totalement dominée par la source 1E 1740.7-2942 (Cordier et al. 1991, Sunyaev et al. 1991). Localisé à $40'$ du centre (~ 100 pc en projection) cette source pouvait en effet expliquer les observations X précédentes. A basse énergie (40-80 keV), il fallait toutefois considérer deux autres contributions variables. La source A 1742-294 (Churazov et al. 1994), un *burst* X déjà bien connu, et une autre source, active en 1991 (alors que 1E 1740.7-2942 était dans un état bas), et qu'au début nous avons considéré comme associée à Sgr A. Grâce aux procédures d'analyse fine des images SIGMA que j'avais développées (chapitre 2) j'ai entrepris l'étude systématique des données SIGMA du bulbe galactique et de la région centrale recueillies pendant les 4 premières années de vie de SIGMA (1750 h d'observation effective). J'ai pu établir que la source transitoire observée en 1991 (et baptisée GRS 1743-290) était localisée à plus de $9'$ de Sgr A*, donc trop loin pour être associée à

⁷ La variabilité alors détectée résultait en fait de la dégradation du détecteur. Nous savons maintenant grâce à SPI / INTEGRAL que la raie à 511 keV du bulbe galactique est de nature diffuse (FWHM $\sim 8^\circ$) et, bien sûr, constante.

Sgr A* (Fig. 2 publication n°. 7, Fig. 6 publication n°. 8). Nous avons donc pu établir des limites supérieures à l'émission de rayons X durs de Sgr A, équivalentes à des luminosités de $3,5 \cdot 10^{35}$ ergs s^{-1} dans la bande 35-75 keV et $2,4 \cdot 10^{35}$ ergs s^{-1} entre 75 et 150 keV.

Les résultats sur les 9 sources SIGMA du bulbe galactique repérées pendant ce premier balayage profond et sur les limites supérieures de l'émission à haute énergie de Sgr A* ont fait l'objet d'une publication dans la revue Nature en 1994 avec le titre (légèrement provocateur) de **Possible Evidence Against a Massive Black Hole at the Galactic Center (Goldwurm et al., 1994, publication n°. 7)**. Dans les conclusions de l'article nous affirmions que si un trou noir massif était tapi dans le noyau galactique, il n'était pas capable de convertir en radiation X/gamma, d'une manière efficace, l'énergie potentielle rendue disponible par l'accrétion des vents stellaires de l'amas IRS16 et qu'il ne se comportait pas simplement comme un AGN de petite échelle. Ce résultat, couplé à celui obtenu, encore avec SIGMA, par nos collègues de Toulouse sur la limite supérieure de l'émission à 511 keV d'une source ponctuelle à la position de Sgr A ($2,45 \cdot 10^{-4}$ ph $cm^{-2} s^{-1}$) (Malet et al. 1995), était très dérangeante. Peu après, une nouvelle classe de modèles de disque d'accrétion autour des trous noirs ont été proposés pour expliquer ce silence X/gamma de Sgr A*.

J'ai ensuite publié des mises à jour de ces limites en ajoutant les nouvelles données SIGMA (1994-1997) sur le centre galactique, d'abord avec mon étudiante en thèse (Vargas et al. 1996) et puis avec un post-doctorant que j'encadrais (Goldoni et al. 1999, Goldwurm et al. 1999). Les figures 4.3 et 4.4 montrent les cartes SIGMA le plus complètes du bulbe galactique et des $4^\circ \times 4^\circ$ centraux de la Galaxie dans des bandes d'énergie entre 40 et 80 keV. Nous avons donc établi la limite supérieure sur la luminosité 30-300 keV de Sgr A* à $1,2 \cdot 10^{36}$ ergs s^{-1} , équivalente à quelque 10^{-9} de la luminosité d'Eddington d'un trou noir de $3,5 \cdot 10^6 M_\odot$.

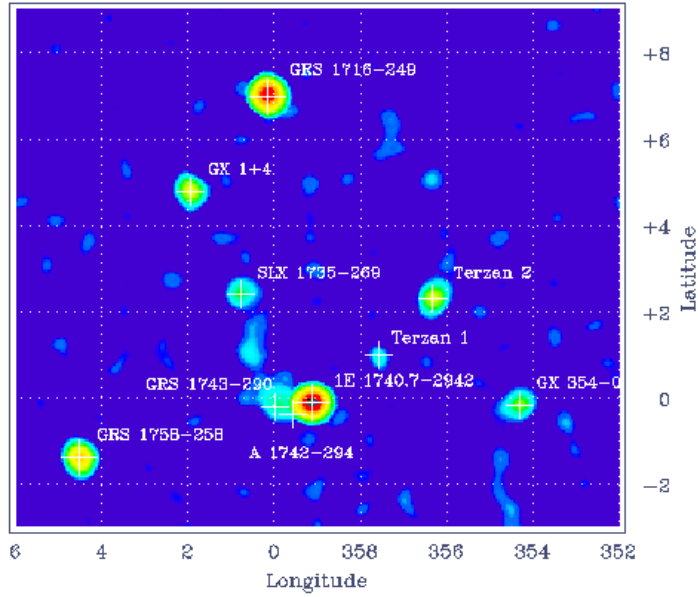


Fig. 4.3 Image du bulbe galactique obtenue avec SIGMA dans la bande 40-80 keV avec 9×10^6 s d'exposition.

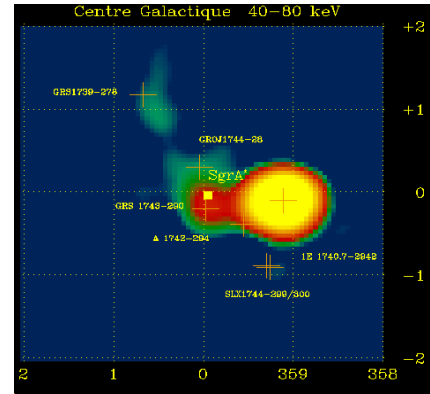


Fig. 4.4 Zoom sur les $4^\circ \times 4^\circ$ de l'image totale SIGMA dans la bande 40-80 keV.

4.4 La question de la luminosité de Sgr A* et les modèles d'accrétion

Le problème posé par les limites supérieures au flux X/gamma de Sgr A* établis avec SIGMA était sérieux. Nous étions en effet capables d'estimer la luminosité totale de Sgr A* : seulement quelques 10^{36} erg s⁻¹. Un trou noir de masse M_\bullet permet, par accrétion, une luminosité maximale (d'Eddington) de $1,3 \times 10^{38} (M_\bullet/M_\odot)$ erg s⁻¹ = $4,5 \times 10^{44}$ erg s⁻¹ pour $M_\bullet = 3,5 \times 10^6 M_\odot$. Certes, cette comparaison n'est adaptée que si une source importante de matière est disponible pour l'accrétion. En dépit des grandes densités observées dans la région, il n'est pas évident que la matière alentour puisse tomber dans le trou noir, il faut un mécanisme de transport du moment angulaire. Néanmoins, une source de matière incontestable est bien présente : les étoiles jeunes de l'amas IRS16. Elles relâchent jusqu'à $10^{-3} M_\odot$ yr⁻¹ par de puissants vents stellaires avec des vitesses de ~ 700 km s⁻¹. A la distance de seulement 0,05 – 0,1 pc du trou noir elles fournissent donc une masse non négligeable de matière qui atteint directement la sphère de capture du trou noir. Des simulations numériques de la dynamique des vents stellaires ont démontré que le taux d'accrétion (au rayon de capture R_A) devrait être de quelque $10^{-4} M_\odot$ yr⁻¹ (Cocker & Melia 1997). Or une telle quantité de matière met à disposition une luminosité d'accrétion de $\sim 10^{43}$ erg s⁻¹ (voir Fig. 4.5). Avec quelle

efficacité peut-elle être convertie en radiation ? Si la matière possède suffisamment de moment angulaire pour se circulariser à grandes distances, alors il peut se former un disque optiquement épais et géométriquement mince, du type décrit par Shakura et Sunyaev (1973). Ces types de flots d'accrétion sont bien connus, ils ont des grandes efficacités, de $\sim 10\%$. La luminosité devrait donc être 10^6 plus élevée que celle mesurée (voir le spectre d'un disque S-S comparé au spectre de Sgr A* en Fig. 4.6). Nous sommes certains qu'un disque de ce type n'est pas présent autour de Sgr A*.

Melia (1992, 1994) avait déjà étudié le cas d'une accrétion purement sphérique de type Bondi Hoyle. Avec un trou noir de quelques $10^5 M_\odot$ il arrivait à expliquer les observations alors disponibles. Toutefois les calculs et les simulations montrent que la matière doit se circulariser à un rayon de $R_C \sim 10-100 R_S$ et un petit disque doit se former. Avec les taux de matière prévus, même un petit disque dépasserait les limites infrarouges. En plus les limites de SIGMA, qui contraignent l'émission bremsstrahlung du plasma en chute libre sphérique, imposent une limite sur la masse de $\sim 10^6 M_\odot$ pour ce modèle, alors que désormais les mesures IR démontrent que le trou noir central dépasse certainement les $3 \cdot 10^6 M_\odot$. Plus récemment, Coker et Melia (2000) ont considéré le cas où le champ magnétique ne se maintient pas en équipartition avec le gaz. Dans ce cas (*sub-equipartition*), l'efficacité radiative est encore réduite et on pourrait, peut-être, expliquer les spectres. Le spectre en Fig. 4.7 montre cette compatibilité marginale du modèle avec les données. Là encore on peut noter que les limites SIGMA (points aux fréquences entre 10^{19} et 10^{20} Hz) posent des contraintes difficiles à expliquer avec ce modèle.

En 1995, à la suite de la publication des limites SIGMA, Narayan et al. (1995) proposèrent des nouvelles solutions aux équations qui régissent la dynamique des flots d'accrétion autour de trous noirs, dans le cas des taux d'accrétions très inférieurs au taux d'Eddington ($\dot{M}_E = L_E/mc^2$). Ces modèles appelés *Advection Dominated Accretion Flow* (ADAF) (voir aussi chapitre 3), supposent que la matière accrétée est engloutie par le trou noir avant que l'énergie gravitationnelle qu'elle emporte puisse être libérée sous forme de rayonnement. La cause d'un tel phénomène est attribuée à un découplage des ions (qui gagnent l'énergie potentielle gravitationnelle dans la chute) et les électrons (qui dominent les processus radiatifs). En effet, pour transférer l'énergie des protons aux électrons, on fait généralement confiance, en plus du couplage Coulombien (connu pour sa faible efficacité), aux turbulences dans le flot. Or Narayan et ses collaborateurs négligent les effets des turbulences et envisagent, un plasma à deux températures, les ions gagnant près du trou noir la température virielle (10^{12} K) alors que les électrons ne dépassent pas les 10^{10} K. Les ions transportent donc avec eux, au-delà de l'horizon, l'énergie gagnée avant qu'elle soit rayonnée

(advection). Des modèles advectifs avaient été envisagés auparavant pour le cas extrême inverse, celui d'un taux d'accrétion super Eddington. Dans ce cas, l'énergie est advectée car le rayonnement reste confiné par diffusion dans le plasma dense et optiquement épais qui est accrété avant de laisser échapper le rayonnement (Abramowicz et al. 1988).

Dans des modèles ADAF, le flot est très chaud, géométriquement épais et optiquement mince, bien qu'on fasse l'hypothèse d'un moment angulaire important (donc une espèce de disque épais, toroïdal), avec dissipation par viscosité et transport du moment angulaire vers l'extérieur. Un terme d'advection est introduit dans les équations et ajusté (avec trois autres paramètres : niveau de couplage proton électron, paramètre de viscosité, densité d'énergie du champ magnétique par rapport au gaz) pour retrouver les spectres observés. La Fig. 4.6 montre le spectre ADAF obtenu par Narayan et al. (1998) pour Sgr A^{*}. L'émission d'un flot ADAF est de type thermique et présente trois composantes : émission synchrotron des électrons thermiques quasi relativistes à différentes températures qui produit le spectre radio et submillimétrique avec auto-absorption à basse fréquence, l'émission Compton inverse qui produit un pic dans la bande IR – visible (où n'existent que des limites supérieures), et un bremsstrahlung thermique d'un gaz optiquement mince depuis R_A qui domine l'émission X. Le spectre a été normalisé pour passer par le flux de la source X observé en 1991 par ROSAT à la position de Sgr A^{*} (Predehl & Truemper 1994). Il peut décrire la partie submillimétrique et les limites supérieures, incluant les limites SIGMA, mais avec un taux d'accrétion de $\sim 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ et une masse du trou noir inférieure à celle estimée actuellement. Par contre, le spectre radio (centimétrique) est bien trop plat pour être expliqué par auto-absorption dans un ADAF.

En 1999 on réalisa les premières observations X du centre galactique avec le puissant télescope de l'observatoire Chandra. Avec une résolution angulaire de 0,5'', inégalée dans le domaine X, ces observations révélèrent que Sgr A^{*} est encore plus faible qu'estimé avec Einstein et ROSAT. La source ROSAT est résolue en plusieurs composantes, dont une positionnée à moins de 0,3'' de la position radio de Sgr A^{*} (Baganoff et al. 2003, Fig. 4.8). La source semble étendue sur $\sim 1''$, elle présente un spectre mou avec une pente en photon de 2,7 et une luminosité (2-10 keV) de seulement $2 \cdot 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ (la moitié de la luminosité du soleil) soit 1/10 de la luminosité estimée avec ROSAT. Cette luminosité, encore plus faible, et le spectre mou (différent d'un bremsstrahlung thermique) n'étaient pas compatibles avec les modèles ADAF simples. Une autre difficulté pour les modèles d'accrétion avait été la découverte d'une polarisation linéaire aux fréquences submillimétriques

(Aitken et al. 2000). Puisque cette composante provient des régions les plus internes du flot d'accrétion, même si le rayonnement est initialement polarisé, le plasma qu'il rencontre devrait le dépolariser par effet Faraday. Les valeurs de polarisation observées imposaient des limites très fortes sur la densité de matière rencontrée et donc sur le taux d'accrétion effectif du trou noir: $10^{-8} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, pour un taux pareil, il n'y a plus besoin de modèles advectifs (Agol 2000). Mais comment expliquer une telle différence avec les taux estimés au rayon d'accrétion à partir des mesures sur les vents stellaires d'IRS 16 ?

Un début de réponse avait été avancé par Blandford & Begelman (1999). Selon eux, les solutions advectives impliquent la présence d'*outflows*. En effet, le fait que l'énergie n'est pas libérée par rayonnement rend le plasma trop chaud, instable et capable de contrer l'accrétion. Pour qu'une partie du plasma accréte, de l'énergie doit être transportée à l'extérieur par des mouvements d'ensemble de masse (*outflows*). Une autre possibilité serait que de l'énergie soit évacuée à grands rayons par une convection due aux turbulences du gaz. A nouveau, cette convection d'énergie réduit le transport de moment angulaire vers l'extérieur est donc le taux d'accrétion effectif pour le trou noir. Récemment, des simulations numériques hydrodynamiques et MHD de flots d'accrétion *sub-Eddington* avec champ magnétique en *sub-equipartition* semblent montrer que tels mécanismes sont en effet à l'œuvre. L'acronyme ADAF a désormais été remplacé par RIAF (*Radiative Inefficient Accretion Flows*) puisque ce n'est pas l'advection d'énergie la principale raison de la faiblesse de Sgr A* mais un véritable manque de matière.

Les difficultés des modèles thermiques ont favorisé un renouveau d'intérêt pour les modèles non thermiques. L'idée que le spectre de Sgr A* soit totalement attribué à des électrons relativistes avec une distribution en loi de puissance avait été proposée et développé par Beckert et collaborateurs (1996) et reprise par Falcke & Markoff (2000) qui ont proposé, pour expliquer la spectre total de Sgr A*, de considérer la présence d'un jet compact de même type, mais moins puissant, que celui des AGN. La base du jet, le *nozzle*, où l'accélération du plasma magnétisé a lieu est une région compacte proche du trou noir. Le mécanisme d'accélération n'est pas identifié mais serait lié à des processus MHD dans le disque d'accrétion. L'émission sub-mm est produite dans le *nozzle* alors que le spectre à plus basse fréquence est dû à un rayonnement synchrotron auto absorbé dans les zones progressivement plus externes du jet. Falcke et Markoff interprètent l'émission X comme du *Synchrotron Self Compton* (SSC). Puisqu'un jet est couplé à un disque, Yuan et al. (2002) ont couplé le modèle jet avec le modèle de disque ADAF, pour expliquer le spectre de Sgr A*, bien que en effet presque la totalité du spectre est dominée par l'émission du jet (Fig. 4.10, a).

Comme on le verra plus tard, nous ne savons pas encore aujourd'hui quel processus physique domine l'émission de Sgr A^{*}, le jet ou le flot d'accrétion. Cette question est d'ailleurs plus générale et concerne aussi les systèmes binaires X, au moins dans leur état *low/hard* (chapitre 3). Dans l'effort de comprendre ces questions j'ai entrepris un programme de recherche avec pour but principal d'éclaircir l'origine de l'émission à haute énergie (le domaine de ma spécialité) avec les observatoires dans lesquelles mon laboratoire était impliqué (XMM-Newton et INTEGRAL).

On peut remarquer que le spectre publié par Narayan et al (1998) présente une pente assez dure dans le domaine X durs/gamma. Bien que faible et hors de la portée de SIGMA, on pouvait espérer la détecter avec INTEGRAL. Pour tester la pertinence des modèles ADAF, nous avions donc prévu de pointer INTEGRAL vers Sgr A^{*}. En effet, j'avais évalué, par simulation numérique, que si le trou noir central de la Galaxie se conformait au modèle ADAF, un signal significatif devait être détecté à l'issue du programme d'observation qui était prévu avec INTEGRAL (Goldwurm et al. 2000, 2001, Fig. 7 de la publication n°. 8). Un autre projet que j'ai poursuivi était d'utiliser XMM-Newton pour compléter l'étude X de Sgr A^{*} et notamment pour déceler une éventuelle variabilité.

J'ai exposé toutes ces questions : le problème de la luminosité, les modèles théoriques, et les perspectives que l'on envisageait au début du siècle (avec une introduction assez complète sur la région du centre galactique et les observations à haute énergie) dans une revue publiée dans les actes du *Workshop INTEGRAL* d'Alicante (**Goldwurm et al. 2001, publication n°. 8**) avec le titre **The Center of Our Galaxy : Activity and High Energy Emission of the Closest Massive Black Hole**. Dans la conclusion, je présentais les perspectives qui me semblaient les plus intéressantes : les observations avec XMM-Newton pour étudier le spectre et la variabilité de Sgr A^{*}, les observations INTEGRAL pour déceler la contribution dans les X durs d'un spectre ADAF, la recherche d'émission à très haute énergie avec GLAST et HESS, les expériences neutrinos et particules (Observatoire Auger) pour la recherche d'anisotropie (et donc peut être d'accélération de particules ou de matière noire) dans la direction du centre galactique.

J'avais soumis le manuscrit de cette revue en printemps 2001. En Septembre 2001 Baganoff et collaborateurs (Baganoff et al. 2001) annonçaient la spectaculaire découverte de sursauts X de Sgr A^{*} avec Chandra.

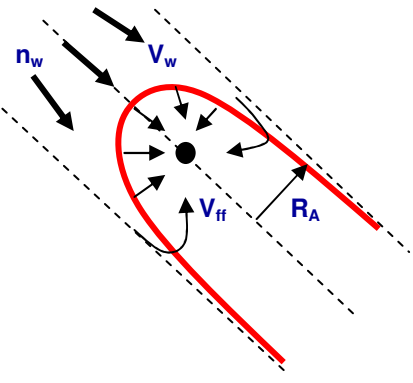
	Quantités	Valeurs pour Sgr A* et vents stellaires de IRS16
	M. Masse du trou noir	$3,5 \cdot 10^6 M_\odot$
$R_S = 2 G M_\bullet / c^2$		$10^{12} \text{ cm} = 0.01 \text{ AU}$
$L_E = 4\pi G M_\bullet m_p / \sigma T$		$4,5 \cdot 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$
n_w densité des vents stellaires		$5,5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$
V_w vitesse des vents stellaires		700 km s^{-1}
\dot{M}_w perte de masse des vents		$3,5 \cdot 10^{-3} M_\odot \text{ yr}^{-1}$
$R_A = 2 G M_\bullet / V_w^2$		$1,9 \cdot 10^{17} \text{ cm} = 0.06 \text{ pc} \approx 1,5''$
$\dot{M}_A = \pi R_A^2 m_p n_w V_w$		$7 \cdot 10^{22} \text{ g s}^{-1} = 10^{-3} M_\odot \text{ yr}^{-1}$
$L_A = G M_\bullet \dot{M}_A / R_S = 1/2 \dot{M}_A c^2$		$3,1 \cdot 10^{43} \text{ erg s} = 0.07 L_E$
$\rho(R) = \rho_A (R_A / R)^{3/2}$		$8 \cdot 10^{-21} (R_A / R)^{3/2} \text{ g cm}^{-3}$
$T_{\text{Sh}} = (3 m_p / 16 k) V_w^2$		$7 \cdot 10^6 (V_w / 600 \text{ km s}^{-1})^2 \text{ K}^\circ$
$T(R) = T(R_A) (R_A / R)$		$8 \cdot 10^6 (R_A / R) \text{ K}^\circ$
$R_c = 2 \lambda^2 R_S$		$< 100 - 1000 R_S$

Fig. 4.5 Schéma simplifié et formules de base de l'accrétion Bondi - Hoyle. Valeurs pour le trou noir du centre de la Galaxie en considérant l'accrétion des vents stellaires de l'amas IRS 16.

R_S : Rayon de Schwarzschild
 L_E : Luminosité d'Eddington
 L_A : Luminosité d'Accrétion
 R_A : Rayon d'Accrétion

\dot{M}_A : Taux d'Accrétion à R_A
 V_{ff} : Vitesse de chute libre
 ρ : Densité
 T : Température

$r = R / R_S$
 T_{Sh} : Température après choc
 R_c : Rayon de *circularisation*
 λ : Moment spécifique du gaz

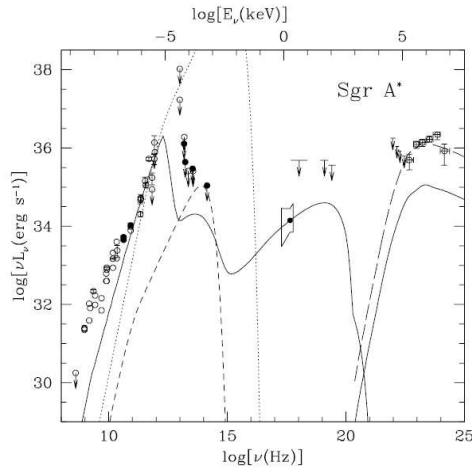


Fig. 4.6 Modèle ADAF (ligne continue) pour spectre total de Sgr A* (Narayan et al. 1998). L'émission d'un disque optiquement épais de type S-S est représentée par la ligne en pointillées.

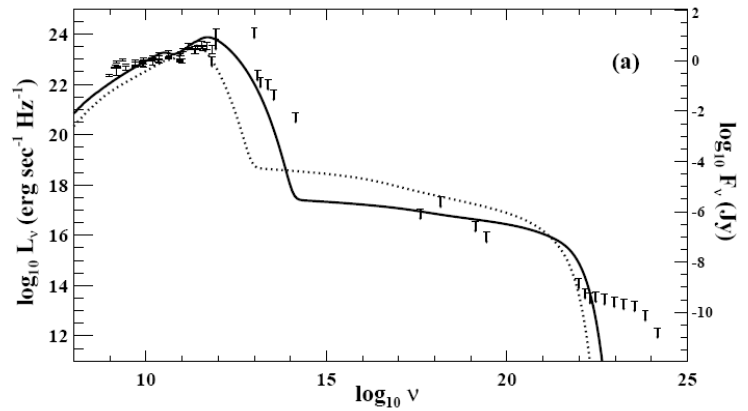


Fig. 4.7 Modèle de Coker et Melia (2000) d'accrétion sphérique avec champ magnétique en régime de *sub-équipartition*, comparé au spectre de Sgr A*.

4.5 L'activité éruptive de Sgr A* : observations avec XMM-Newton

La découverte des sursauts X géants de Sgr A* a sûrement été l'un des résultats les plus spectaculaires des dix dernières années de l'astronomie X. Chandra, le grand observatoire X de la NASA, après les observations de 1999, avait de nouveau pointé le centre galactique en octobre 2000 avec son instrument spectro-imageur ACIS. Cette fois la paisible source coïncidant avec Sgr A* montra une variation temporelle de flux spectaculaire: une éruption avec une magnitude maximale d'un facteur 50 par rapport à son niveau de quiescence (Baganoff et al. 2001). La luminosité de l'objet augmenta de $2 \cdot 10^{33}$ à 10^{35} erg s⁻¹ en ~ 5000 s pour ensuite décliner à son niveau de quiescence en de temps comparables. Des variations de 600 s étaient visibles dans la courbe de lumière et le spectre montrait un indice spectrale ($\sim 1,3$) bien plus dur que dans l'état de quiescence ($\sim 2,7$).

Ces résultats étaient très contraignants pour les modèles mais la précision de Chandra ne semblait laisser aucun doute concernant la provenance du phénomène. Avec sa résolution angulaire meilleure qu'une seconde d'arc, le télescope Chandra avait montré que dans un rayon de 10", on décelait plusieurs sources ponctuelles X du même niveau de flux de Sgr A* en plus d'une émission diffuse bien modélisée par un gaz chaud de ~ 10 keV. Le sursaut était bien centré sur Sgr A* et ne pouvait pas être attribué à d'autres sources ; une confirmation était certes importante.

En décembre 1999, l'observatoire XMM-Newton avait été lancé par l'ESA avec une Ariane 5 depuis Kourou. Complémentaire de Chandra, XMM a une moins bonne résolution angulaire ($\sim 6''$) mais son plan focal comprend trois caméras X (2 MOS et 1 PN dans l'expérience EPIC) pour un total de plus de 5000 cm² de surface efficace sur une bande plus large (jusqu'à 12 keV). Le balayage du centre galactique (plusieurs pointées pour couvrir les $2^\circ \times 1^\circ$ centraux) était bien sûr un des programmes principaux de XMM et le SAP était impliqué grâce au temps garanti dont il disposait pour sa participation à l'instrument EPIC. L'observation du demi degré central (correspondant au champ de vue de XMM) avait été retardé par de événements solaires et finalement le pointé en question, GC06, fut programmé pour Septembre 2001. Même si les données furent disponibles déjà dès la fin de l'année 2001, j'ai ne pas pu les étudier avant le printemps 2002 à cause des tâches de service du programme INTEGRAL. J'ai alors proposé à Elisabeth Brion le travail d'analyse du

champ XMM GC06 pour étudier Sgr A* dans le cadre de son stage DEA. Avec le soutien de Philippe Ferrando, nous avons donc entrepris l'analyse des données. Le pointage était aussi affecté en partie par l'activité solaire, mais nous avons décelé que vers la fin de l'observation les courbes de lumière des événements sélectionnés à l'intérieur de 10'' autour de Sgr A* montraient un brusque accroissement (Fig. 4.9, haut).

La publication n° 9 : A New X-Ray Flare from the Galactic Nucleus Detected with the XMM-Newton European Photon Imaging Cameras (Goldwurm et al. 2003), et les papiers qui suivirent (Goldwurm et al. 2003b, Brion et al. 2004, Goldoni et al. 2004), relatent en détail les analyses et les résultats obtenus. Nous avons trouvé ce deuxième sursaut X de Sgr A* avec XMM au cours des dernières 1000 s, juste avant la fin de l'observation de 26000 s. La luminosité de la source s'était accrue d'un facteur ~ 25 , avec un spectre plat (index de la loi de puissance en photon $\alpha = 0,7 \pm 0,5$), sans montrer des variations spectrales évidentes. A part le fait de confirmer la découverte de Chandra, ce résultat était important car il montrait que les éruptions de Sgr A* étaient relativement fréquentes. En considérant le temps de pointage Chandra et XMM on montrait que Sgr A* manifeste des sursauts avec des magnitudes de l'ordre de 50 et des durée de quelques heures à peu près une fois par jour. Ce point était important parce qu'en radio Sgr A* varie sur des échelles de temps bien plus longues et jamais de plus d'un facteur 2. Si le sursaut Chandra était un phénomène rare et isolé, on ne pouvait pas le comparer aux caractéristiques radios générales. Une fois démontré que ce n'était pas un cas rare, et puisque Sgr A* avait été longuement observé en radio depuis sa découverte et n'avait jamais été observé dépasser les 2 Jy, il semblait évident que les sursauts X n'étaient pas accompagnés de sursauts radio avec une magnitude similaire.

Les modèles qui cherchent à rendre compte des sursauts prédisent différentes relations entre l'émission à différentes fréquences. Avant de discuter les efforts de modélisation des sursauts, je mentionnerai deux autres découvertes intervenues l'année suivante, en 2003. La première c'est une nouvelle détection de sursaut que nous avons réalisée avec nos collègues de l'Institut Max Planck de Munich (MPE, Allemagne) en utilisant le temps garanti XMM-Newton attribué au MPE. Pendant une observation courte de Sgr A*, le flux de la source s'était accru d'un facteur presque 200 en luminosité pour arriver à un maximum de $3,6 \cdot 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$. Avec un tel flux, les mesures de XMM avaient été très précises. Le sursaut avait atteint le maximum en 20 mn et redescendu au niveau de quiescence avec la même échelle de temps (Fig. 4.9, bas). Pendant le sursaut, des microstructures de 200 s étaient visibles et cette fois le spectre était mou avec un pente ($\alpha = 2,5 \pm$

0,3) similaire au spectre en quiescence (Porquet et al. 2003, Goldoni et al. 2004) et sans variations spectrales évidentes. Une fois de plus ce résultat remarquable rendait encore plus difficile la modélisation : les spectres ne sont pas toujours les mêmes, ce qui pouvait impliquer que les sursauts les plus intenses soient dus à un mécanisme différent des moins intenses.

En 2003, un autre résultat important fut annoncé. Cette année là l'étoile, désormais célèbre, S2 de l'amas central s'était déplacée suffisamment pour rendre le champ de Sgr A* visible aux observations infrarouges. Genzel et collaborateurs, en utilisant la nouvelle camera NACO au foyer d'un des télescopes de 8 m du VLT (*Very Large Telescope*) équipé d'un système d'optique adaptative, découvraient des sursauts IR de Sgr A* dans les bandes H, K, L. Les astronomes estimèrent le taux de ces sursauts entre 2 et 6 par jour (bien plus élevé que pour les rayons X), des variations d'intensité d'un facteur jusqu'à 5, des temps de montée et de descente similaires aux éruptions X. Des résultats similaires furent obtenus par Ghez et al. (2004) avec le télescope Keck. L'émission IR a été attribuée à rayonnement de synchrotron non thermique.

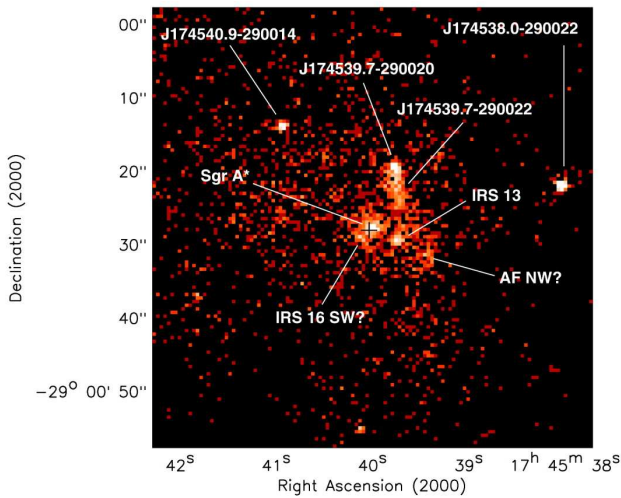


Fig. 4.8 Image X dans la bande 2-8 keV de la minute d'arc au centre de la Galaxie obtenue avec Chandra.

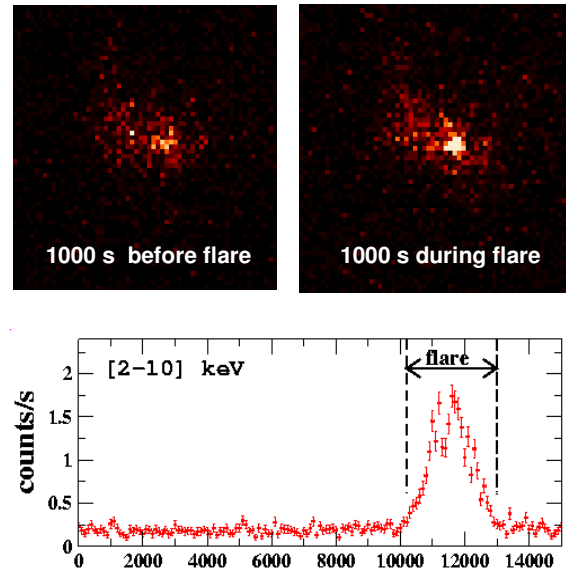


Fig. 4.9 *Haut* : Images X de XMM-Newton (MOS) avant et pendant l'éruption de Sgr A* en septembre 2001. *Bas* : Courbe de lumière de l'éruption d'octobre 2002 obtenue avec XMM-Newton (PN).

En premier lieu il faut remarquer qu'aucun modèle ADAF (ou RIAF) ne pouvait expliquer les sursauts X. Leurs durées (de 3 à 0,7 h) impliquaient une zone émissive plus petite que $100 R_S$. De plus, les microstructures vues par Chandra (~ 600 s) et encore plus celles vues par XMM (~ 200 s) réduisaient ces dimensions à 6 - 20 R_S . Or le bremsstrahlung thermique des RIAF est censé se produire au delà de $1000 R_S$, jusqu'au R_A ($\sim 10^5 R_S$) et donc les modèles RIAF étaient hors de cause, même si en principe ils pouvaient encore expliquer l'émission X en quiescence.

De la découverte du sursaut X, Markoff et al. (2001) avaient proposé qu'un réchauffement soudain des électrons dans le jet compact puisse donner lieu à des éruptions similaires à celle observée par Chandra. Pour expliquer le spectre relativement dur, les auteurs favorisaient un réchauffement des électrons produits par des reconnections de champs magnétiques. En plus du mécanisme SSC (Fig. 4.10, a), ils considéraient aussi la possibilité que les photons X puissent être générés par synchrotron. Nous verrons que l'explication des sursauts X par de l'émission synchrotron rencontre des difficultés importantes.

Dans une série de papiers, Melia et collaborateurs (Melia et al. 2001, Liu & Melia 2002, Liu et al. 2004) avaient raffiné le modèle d'accrétion sphérique avec champs magnétiques hors équipartition en considérant l'effet de la circularisation du flot à des distances $< 50 R_S$. Ils ont trouvé que le champ magnétique se régénère par effet dynamo dans le flot en mouvement képlérien et donc que l'émission de radiation redevient importante dans la partie la plus interne du système. Ils ont alors étudié la formation d'un disque compact, chaud et très magnétisé qui peut expliquer l'émission quiescente de Sgr A* et les sursauts X. En considérant l'accélération stochastique des électrons dans le disque au cours de leurs interactions avec les ondes ou turbulences du plasma, ils peuvent expliquer l'émission quiescente et modéliser la présence de sursauts X durs (Fig. 4.10, b) et mous et leur relation (fréquences différentes d'apparition) avec les sursauts infrarouges (Fig. 4.10, c). Dans ce modèle les émissions millimétriques, submillimétriques et infrarouges sont dues à du synchrotron optiquement mince d'une distribution quasi Maxwellienne d'électrons relativistes, alors que l'émission X est du type SSC. L'émission radio doit par contre être produite par les régions plus externes, au delà du rayon de circularisation du flot ($50-100 R_S$) par une émission synchrotron optiquement épaisse. La variabilité (sursauts X et IR) est due à l'accélération d'électrons induite soit par des phénomènes locaux de recombinaison de lignes de champ, soit par des fluctuations globales du tore dues à des instabilités MHD ou à des augmentations soudaines du taux d'accrétion.

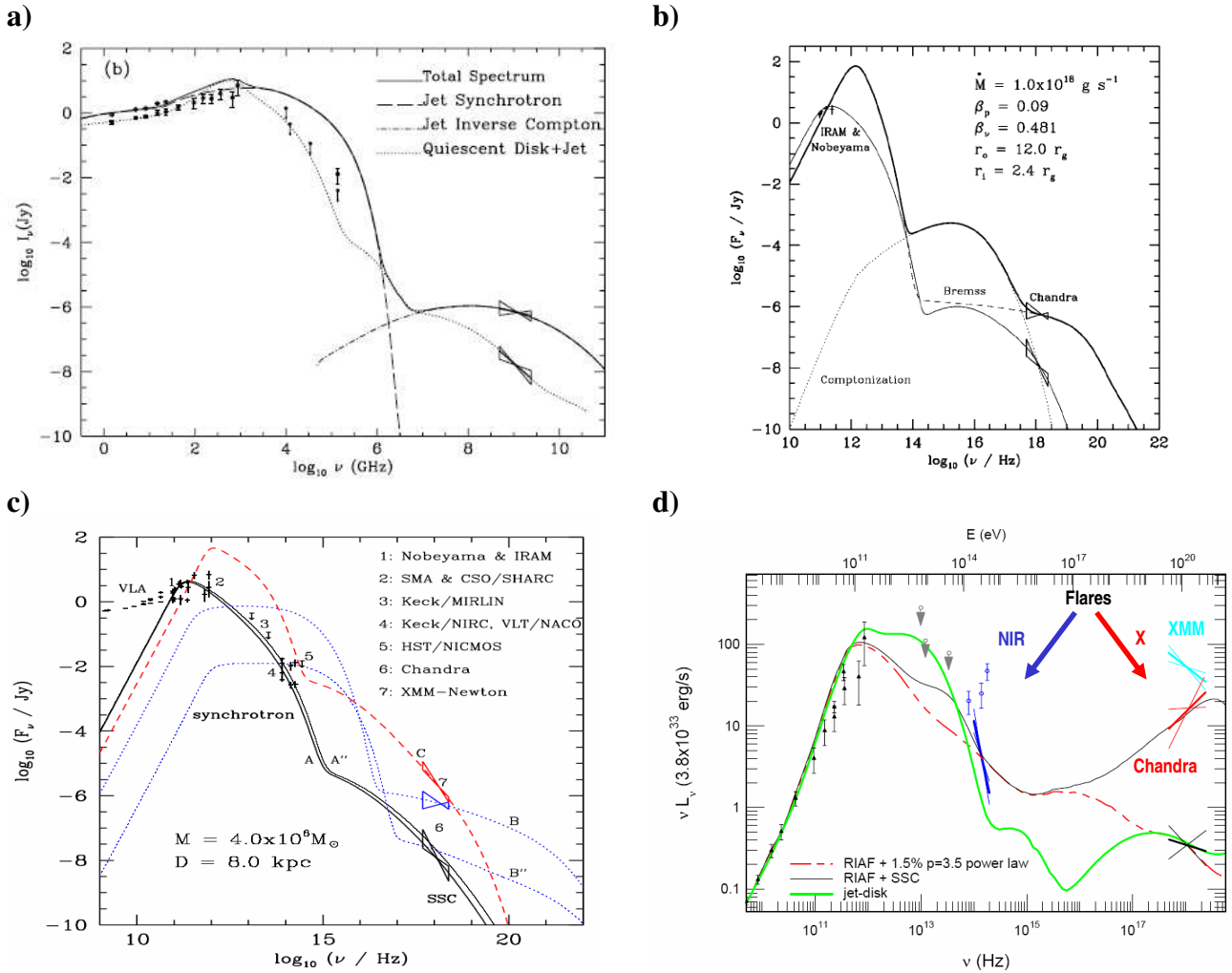


Fig. 4.10 Modèles des spectres des sursauts X de Sgr A* :

a) jet (avec disque) ou le sursaut X est produit par une augmentation de la température des électrons

b) disque compact et chaud magnétisé pour les sursauts X durs

c) disque compact et chaud avec accélération stochastique pour les sursauts durs et mous

d) RIAF avec composante non thermique et spectres IR observés par Eisenhauer et al. (2005)

Dans tout les cas, les données et les modèles pour l'émission en quiescence sont aussi indiqués.

Un autre modèle proposé a été le RIAF où, pour expliquer les éruptions X et IR, les auteurs ont ajouté une composante non thermique variables avec, là encore, la possibilité de produire les photons X par SSC ou par synchrotron (Yuan et al. 2003, 2004). Dans ces modèles, on considère que la densité du plasma en accréation ne suit pas une loi typique de Bondi (Fig. 4.5) mais plutôt une loi de puissance d'indice $< 1,5$ qui dépend de l'effet de la convection ou des *outflows*. Le modèle tend plutôt à décrire la zone entre le rayon d'accréation R_A ($\sim 10^5 R_S$) et $\sim 1000 R_S$ où l'émission X

quiescente vue par Chandra semble de nature diffuse (Fig. 4.8) sur des échelles de distance ($\sim 1.5''$) comparables à R_A . Les particules non thermiques des sursauts sont généralement accélérées par des processus de type éruption solaire (reconnexion des lignes de champ magnétique). Les modèles diffèrent surtout par leurs prédictions quant à la distribution spectrale du rayonnement et les corrélations des variabilités dans de différentes bandes en fréquence (sub-mm, IR, X). Il serait intéressant d'observer simultanément des sursauts X, tant de type dur que de type mou, dans des bandes IR, sub-mm et aussi X dur et gamma. Nous avons cherché à réaliser ce programme avec une vaste campagne d'observation multi longueurs d'onde organisée en 2004. Mais avant d'aborder la description de cette campagne, je vous présenterai le résultat de la recherche d'émission X dur et gamma de Sgr A*.

4.6 Le noyau galactique vu par INTEGRAL

INTEGRAL a observé le centre galactique à plusieurs reprises dès l'hiver et le printemps 2003. Une fois les premières mosaïques d'images déconvoluées obtenues avec le télescope IBIS et la caméra ISGRI (voir chapitre 2), nous nous sommes rendus compte qu'une émission significative était visible en direction de Sgr A*. C'était relativement inattendu puisque, comme discuté dans les chapitres précédents, l'émission attendu d'un spectre ADAF produit par Sgr A* était très faible et nécessitait un temps d'observation bien plus long que ceux disponibles à ce moment. Nous avons annoncé la découverte de cette émission dans une première lettre, **INTEGRAL Detection of Hard X-Ray Emission from the Galactic Nuclear Region**, par **Belanger et al. 2003 (Publication n° 10)**, dans laquelle nous avons présenté les premières images X dur / gamma du centre galactique obtenues avec INTEGRAL (voir Fig. 1 de la publication n° 10). Une étude détaillée des données, avec l'analyse et la sommation (voir chapitre 2) de plus de 500 poses individuelles enregistrées entre le 28 février et le 1^{er} mai 2003 pour un total de $8,5 \cdot 10^5$ s effectives à la position de Sgr A*, a montré la présence d'une source significative (8σ entre 20-40 keV, 4σ entre 40-100 keV). L'analyse fine (voir chapitre 2) de la région centrale de $2^\circ \times 2^\circ$ avec la prise en compte de toutes les autres sources ponctuelles, la plupart étant des systèmes binaires avec étoiles à neutrons (A1742-294, KS 1741-293, 1E 1743.1-2843, SLX 1744-299/300) et le microquasar 1E 1740.7-2942, a permis de localiser cette nouvelle source, appelée IGR J1745.6-2901, à moins de $1'$ de Sgr A* avec néanmoins une erreur de $4'$. Cette erreur (relativement grande), comme les autres incertitudes, était surtout due à la mesure et la modélisation encore très préliminaire de la structure

du bruit de fond. L'analyse temporelle des valeurs du flux de la source obtenues dans les différentes poses indiquait la présence d'une variabilité, avec notamment un sursaut détecté en avril, qui s'écartait de la moyenne de 5σ . Ce résultat, s'il avait été confirmé, aurait été très important car il aurait prouvé que la source était d'une taille fort réduite. Nous mettons toutefois en garde le lecteur du fait que ce résultat était encore préliminaire et que la variabilité pouvait être due à de mauvaises corrections du bruit de fond. Dans une deuxième phase, nous avons analysée avec des meilleures traitements et des meilleurs cartes de fond toutes les données de l'année 2003 incluant les poses d'avril et nous avons trouvé que la source était bien présente, mais que par contre elle ne semblait pas variable (Goldwurm et al. 2004).

L'analyse la plus complète jusqu'à aujourd'hui des images INTEGRAL du centre galactique est certainement celle présentée dans l'article : **A Persistent High-Energy Flux from the Heart of the Milky Way: Integral's view of the Galactic Center** par Bélanger et al., 2006 (Publication n  . 11). Dans ce travail détaillé, réalisé surtout par Guillaume Bélanger dans le cadre de sa thèse de doctorat (dans laquelle on pourra d'ailleurs trouver tous les détails de ces travaux), nous avons présenté le traitement complet de toutes les données recueillies en 2003 et 2004 pour un total de 7×10^6 s d'observation (2174 poses) et une exposition effective sur Sgr A de $4,7 \times 10^6$ s. Les images reproduites dans ce papier (Fig. 1, Fig. 3 de la publication n  . 11) sont les plus précises de toutes les images X durs/gamma jamais obtenues pour cette région. En Fig. 4.11, je compare l'image IBIS/ISGRI à celle de XMM-Newton obtenue lors du balayage des régions centrales (Decourchelle et al. 2002). Elles montrent que la zone de ciel vers le centre de notre galaxie est bien dominée dans le domaine X dur/gamma mou par des systèmes binaires X avec des étoiles à neutrons et surtout par le microquasar 1E 1740.7-2942 (la source la plus brillante en moyenne, même si elle il montre des phases de basse luminosité). Pourtant IGR J1745.6-2901 apparaît très significative, avec 45σ dans la bande 20-40 keV, et reste visible jusqu'à 120 keV. La source reste positionnée à une distance de $\sim 1.1'$ de Sgr A* avec une erreur réduite à $1'$. Dans le papier, on présente notamment l'analyse fine d'images avec laquelle nous avons localisé les sources (voir Fig. 2 et Table 2 de la publication n  . 11). Le spectre de la source est en loi de puissance avec $\alpha = 3,0$ et on ne détecte pas de variabilité significative à aucune échelle temporelle. Ceci laisse ouverte la possibilité que la source soit de nature diffuse, bien que son profile soit compatible avec la SPSF de IBIS / INTEGRAL.

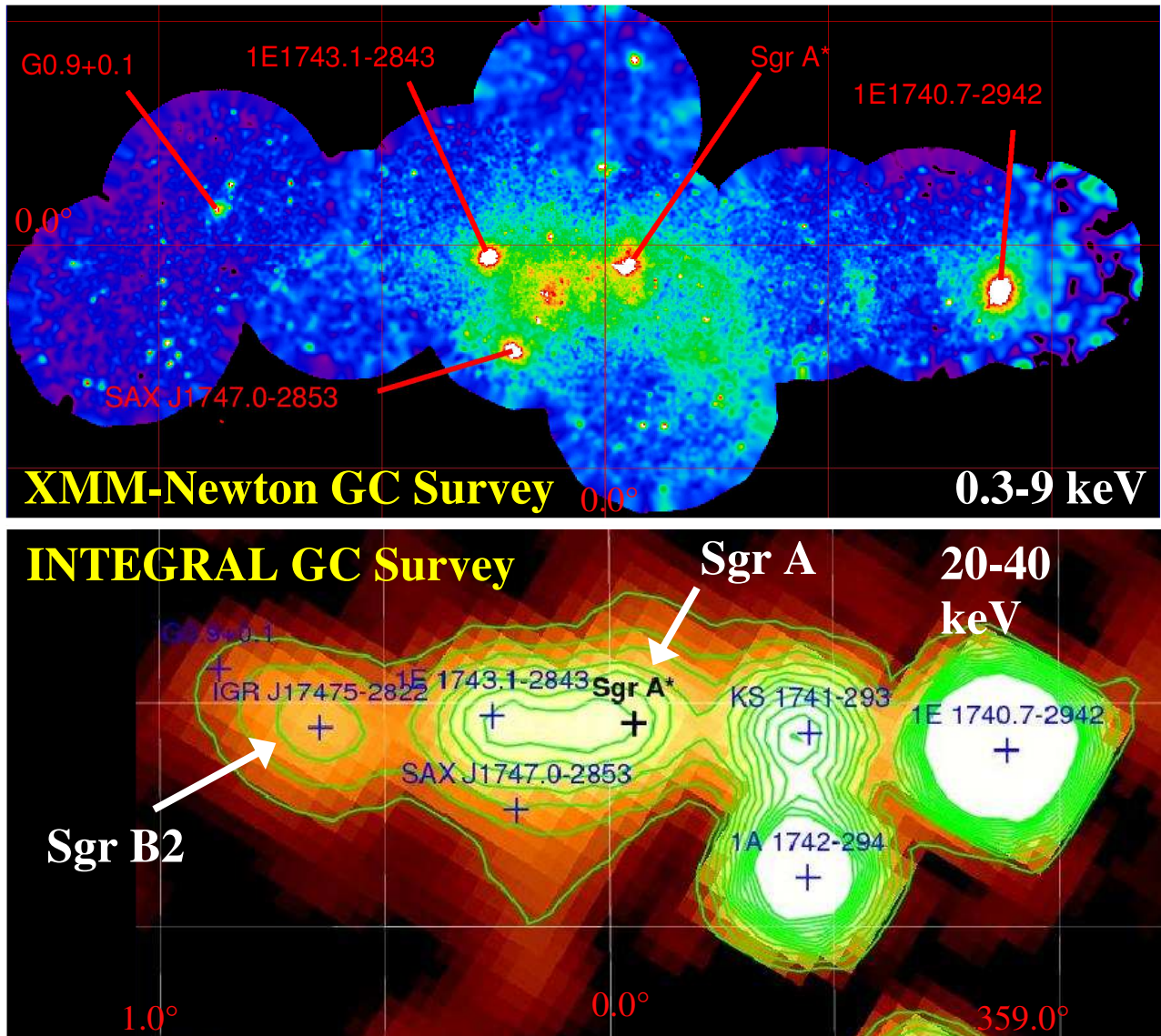


Fig. 4.11 *Haut* : Le centre de notre galaxie ($2^\circ \times 1.5^\circ$) vu par XMM-Newton dans la bande 2-10 keV (Decourchelle et al. 2002). *Bas* : La même région vue par INTEGRAL (IBIS/ISGRI) dans la bande 20-40 keV (Bélanger et al. 2006).

Une partie des observations utilisées (~ 600 ks) avaient été réalisées en coordination avec XMM-Newton (dans le cadre de la campagne 2004, voir section suivante) et nous avons donc pu déduire un spectre X de la région incluse dans la SPSF de IBIS/ISGRI (rayon $\sim 8'$) avec des données XMM contemporaines à une partie des données INTEGRAL (non pas à toutes, ce qui n'est pas trop préoccupant puisque la source INTEGRAL ne montre pas de variabilité). Le spectre combiné reproduit en Fig. 8 de la publication n°. 11, montre à quel point les données X et gamma s'ajustent

bien. Toutefois le modèle (thermique avec 2 températures, 1 keV et 6,5 keV) qui explique bien le spectre continu et de raies de l'émission diffuse X entre 1-10 keV et qui domine l'émission dans les 10' autour de Sgr A^{*}, ne peut pas expliquer les points INTEGRAL à haute énergie. Ceux ci doivent être dus à une autre composante avec un spectre relativement mou ($\alpha \sim 3$) entre 30-120 keV et un spectre plat ($\alpha \sim 1,0-1,5$) au dessous d'une énergie de cassure (*break*) de 27 keV, pour une luminosité total 20-400 keV de $5 \cdot 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$.

4.7 Interprétation des données INTEGRAL et observations jusqu'au TeV

La question qui s'est donc posée était celle de la nature de cette composante qui ne montre pas d'une manière évidente une contrepartie à basse énergie. La résolution angulaire d'INTEGRAL est suffisante pour exclure les sources binaires brillantes connues (persistantes et transitoires). La précision de localisation de 1' nous a aussi permis par exemple d'exclure des sources transitoires brillantes observées auparavant dans un rayon de $\sim 10'$ autour de Sgr A^{*} (GRS 1741.9-2853, AXJ 1745.6-2901, GRS 1743-290). Il n'en reste pas moins que les sources transitoires faibles mais très proches de Sgr A^{*} observées par Chandra et XMM dans l'arc minute centrale auraient pu contribuer à la source IGR. En utilisant les données simultanées recueillies par XMM (voir section suivante) et les résultats publiés par Munro et al. (2004) nous avons pu, en considérant la stabilité et l'intensité de la source INTEGRAL, exclure une contribution importante de ces sources transitoires faibles à IGR.

Compte tenu de l'intensité de la source gamma et du fait qu'il n'y a pas de contrepartie X ponctuelle claire, nous sommes amenés à conclure que l'émission gamma est de nature diffuse même si elle était concentrée dans les 10-30 pc centraux.

Cette conclusion concerne bien évidemment Sgr A^{*}. Cette émission stable n'est probablement pas due directement à la source Sgr A^{*} ou à ses sursauts X. Même si une telle contribution n'est pas à exclure, la source IGR est trop intense et l'émission X de Sgr A^{*} est trop faible pour que cette dernière puisse être la principale responsable de la source INTEGRAL. Ceci est bien montré en Fig. 4.12, où j'ai reporté le spectre total de Sgr A^{*} (adapté d'une figure publiée par Aharonian & Neronov 2004) avec le spectre de IGR J1745.6-2901. On peut voir que celui-ci est bien trop élevé pour être dû à Sgr A^{*}, même en considérant des sursauts X très durs, si on tient compte de la

fréquence des sursauts X, bien établi maintenant à seulement un par jour (grâce notamment à notre campagne d'observation 2004, voir section suivante).

Cela ne veut pas dire que le trou noir ne soit pas à l'origine d'une telle émission. La discussion des résultats que nous avons développée dans Bélanger et al. (2006) mets en relation la source IGR avec la détection d'une source de rayonnement à très haute énergie (\sim TeV) repéré par HESS et d'autres expériences du même type (Whipple et Cangaroo). Ces types de télescopes utilisent la détection des gerbes de particules induites dans l'atmosphère par des rayons gamma de très haute énergie (\sim TeV) en mesurant la lumière Tcherenkov que ce type de gerbes suscitent. Les meilleures mesures sont celles de HESS qui a cartographié la région du centre galactique à partir de 2003 et détecté deux sources brillantes : une identifiée avec le SNR G 09+09 et l'autre avec Sgr A (Aharonian et al. 2004, 2005, voir Fig. 4.12). Cette dernière est positionnée à moins de 1' de Sgr A*, elle présente un spectre en loi de puissance avec un indice de 2,2 qui s'étend de 300 GeV à 10 TeV avec une luminosité totale de 10^{35} erg s⁻¹ et qui n'a pas montré de variabilité entre 2003 et tout 2004.

Une telle source indique une présence considérable de particules accélérées dans les régions centrales. Elle ne semblerait pas être en relation avec l'autre source de haute énergie de la région, la source EGRET 3EG J1746-2851. Cette source de photons d'énergie supérieure à 100 MeV, avec une luminosité constante de 10^{37} erg s⁻¹, avait été étudiée par Mayer-Hasselwander et collaborateurs (1998) et puis incluse dans le 3^{ème} catalogue des sources EGRET (Hartman et al. 1999). Alors que Mayer-Hasselwander la considère compatible en position avec Sgr A, elle est positionnée dans le catalogue 3EG à 0,17° du centre galactique avec un rayon d'erreur de 0,12°. Toutefois, la confusion dans cette région complexe ainsi que la médiocre résolution angulaire d'EGRET (\sim 1°) laissent des doutes sur l'éventuelle contribution de Sgr A à la source EGRET. Les spectres des sources EGRET et HESS sont reproduits en figure 4.12 avec le spectre radio – infrarouge – X de Sgr A* et celui de la source INTEGRAL.

La relation entre les sources gamma du centre galactique et l'origine de l'accélération de particules n'est pas encore expliquée. La possibilité que des protons soient accélérés dans les couches plus internes du flot d'accrétion sur le trou noir massif a été considérée par différents auteurs (Markoff et al. 1999, Narayan et al. 1998). Les protons donneraient alors lieu, par interaction p-p, à des pions et muons qui produiraient des gamma de haute énergie. Le problème de base est que si une quantité importante de protons interagit dans cette région, les leptons secondaires produiraient, dans le champ magnétique de 10 G, une émission de synchrotron qui dépasserait les mesures radio. Par

exemple, le spectre ADAF de Narayan et al (1998) en Fig. 4.6 peut expliquer le spectre de la source EGRET (courbe à grands tirets) mais pas son niveau de flux, à moins de contredire les mesures radio. Aharonian et Neronov (2005) ont considéré le rôle du trou noir dans la production d'émission au TeV. Un certain nombre de mécanismes pourraient être viables et compatibles avec le reste du spectre de Sgr A* (modèles hadroniques basé sur interactions photon-meson et proton-proton, mais, en général, les spectres obtenus ne rendent pas compte de l'émission de la source IGR, surtout en raison du spectre mou ($\alpha \sim 3$) qu'elle affiche.

Une autre possibilité serait que les protons, bien qu'accéléérés par le trou noir, diffusent hors de la zone interne pour interagir avec les protons du milieu interstellaire à des distances (2-3 pc) où le champ magnétique est plus faible. L'échelle temporelle de cette diffusion devrait être de $10^5 - 10^6$ yr et donc la source ne serait pas variable. Atoyan et Dermer (2004) ont discuté la possibilité qu'une espèce de *plérion* soit créée par les *outflows* qui accompagnent un flot de type ADAF. Le choc terminal de ce vent pourrait accélérer les électrons jusqu'à des énergies de 10 TeV et donc donner lieu à la source HESS par effet Compton inverse. Ce modèle est plutôt exotique et en tout cas ne rend pas compte, lui aussi, de la source INTEGRAL.

Toujours en relation avec les sources HESS, EGRET mais aussi avec les anisotropies observées par les détecteurs de rayons cosmique AGASA et SUGAR, Crocker et al. (2005) ont discuté la possibilité que la source d'accélération de protons responsable de l'émission au TeV soit les *chocs* associés à l'anneau en expansion du reste de supernova Sgr A East. Ce SNR de 10^4 ans d'âge est en interaction avec les nuages moléculaires de la région qui ont des densités de l'ordre de 10^5 cm^{-3} . Les collisions des particules accélérées avec ce milieu dense produisent des pions qui vont se désintégrer en photons gamma de 70 MeV et plus et en muons pour déclencher ensuite des cascades électromagnétiques. L'émission au-delà de 100 MeV est principalement due au spectre gamma généré par désintégration de π_0 , et aux spectres au-deçà de 100 MeV par bremsstrahlung, Compton inverse et synchrotron des électrons secondaires. Il reste pourtant un certain nombre de problèmes. En premier, le spectre EGRET et HESS ne se combinent pas facilement. En deux, si le spectre de la source IGR est de nature synchrotron, alors on devrait observer aussi un spectre non-thermique dans le domaine X, qui n'est pas le cas. En effet l'émission X de Sgr A East a été étudiée très en détail avec les observatoires Chandra (Maeda et al. 2002, Park et al 2004) et XMM-Newton (Sakano et al. 2004); bien qu'elle soit concentrée à l'intérieur de l'anneau radio du SNR, elle est de nature thermique.

Nous n'avons pas encore de réponse à toutes ces questions mais l'exemple de G 0.9-0.9 (bien connue pour contenir un *pulsar wind nebula*) et d'autres sources HESS associée à des SNR de type coquille avec faible émission X, laissent penser que Sgr A East reste un candidat crédible pour expliquer les sources gammas molles et dures du centre galactique.

Je voudrais mentionner deux autres possibilités qui pourraient se révéler importants dans la suite. Le fait que le spectre de la source IGR se combine assez bien avec le spectre X intégré de la région comprise sous la SPSF de IBIS/ISGRI est intrigant. Le spectre intégré X contient l'émission de Sgr A^{*}, les autres sources ponctuelles faibles, Sgr A East et l'émission diffuse X du centre galactique. L'émission diffuse relativement énergétique ($kT > 8-10$ keV) des régions centrales, observée en X avec toute sa panoplie complexe de raies du fer et d'autres éléments, représente une énigme depuis plus d'une décennie (Koyama et al. 1996). En effet, cette composante X est assez bien décrite par un modèle de plasma thermique (Muno et al. 2004), mais la température du gaz est trop élevée pour permettre son confinement gravitationnel dans les régions centrales. La possibilité que tout ou une partie de l'émission observée soit de type non thermique, et donc plutôt liée à des processus d'accélération in situ (Dogiel et al. 2002) ou à une composante de basse énergie des rayons cosmiques (Valinia et al 2000, Tatischeff et al. 2000, voir aussi Tanaka et al. 2000), avait déjà été avancée. Or le spectre de IGR semble en effet tout simplement une extension non thermique de l'émission X diffuse du centre galactique. Selon l'analyse que nous avons fait avec cette composante non thermique (nécessaire pour décrire les données INTEGRAL) la température de la composante thermique nécessaire pour rendre compte du spectre X est réduite à 6 - 6,5 keV et soulage en partie le problème du confinement.

Une autre possibilité a été avancée récemment par Revnivtsev et collaborateurs (2006), qui ont analysé les données du satellite RXTE et ont trouvé que l'émission X diffuse du plan galactique (le *galactic ridge emission*) est très bien expliquée par une population de sources ponctuelles X qui suit la distribution observée en infrarouge des étoiles. En extrapolant leur résultat au centre galactique ils interprètent la source IGR J1745.6-2901 comme la somme de la contribution de sources X que l'on ne peut pas résoudre (et dont la majorité serait des variables cataclysmiques).

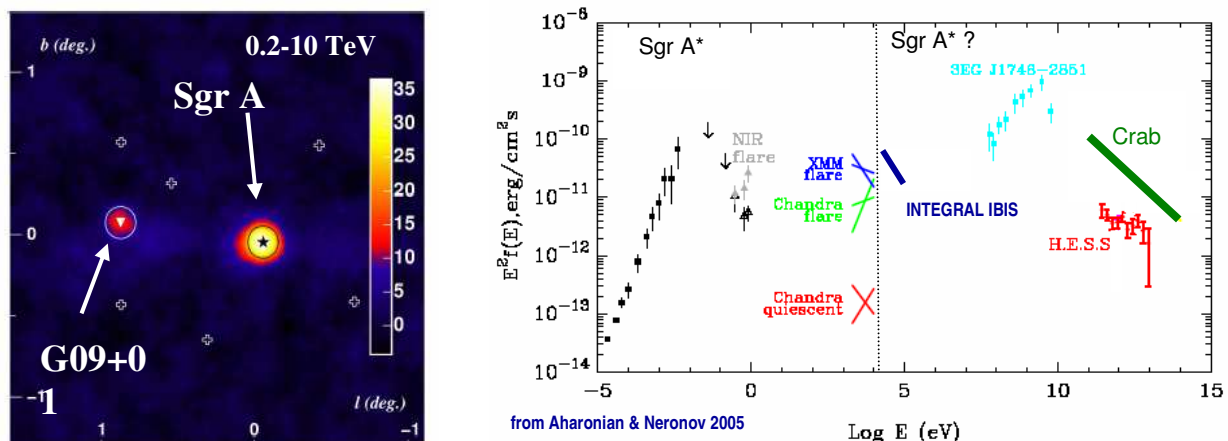


Fig. 4.12 *Gauche* : Image du centre galactique obtenue par HESS dans la bande 0,2-10 TeV (Aharonian et al. 2005). *Droite* : Spectre de Sgr A* avec celui des sources INTEGRAL, EGRET et HESS du centre galactique (d'après Aharonian & Neronov 2005).

4.8 La campagne 2004 d'observation multi longueurs d'onde de Sgr A*

Après cette digression dans le domaine des très hautes énergies qui nous a amenés à discuter d'objets relativement différents des trous noirs, je reprends les points principaux que nous avons évoqué auparavant, pour présenter la campagne d'observation 2004 sur Sgr A*.

Entre 1990 et 1997 nous avons utilisé le télescope gamma SIGMA pour démontrer que Sgr A* était très faible aussi dans le domaine des rayons gamma (40-300 keV) (Goldwurm et al. 1994, Goldoni et al. 1999). Ce résultat, et l'ensemble des autres mesures à plus basse énergie, montraient que le trou noir central n'émettait pas l'énergie rendue disponible par l'accrétion de la matière interstellaire environnante. Son comportement impliquait des modèles d'accrétion différents dans lesquels l'efficacité radiative est réduite. Depuis 1990, des théoriciens ont essayé de modéliser l'accrétion faiblement radiative dans Sgr A*. Des modèles d'accrétion sphérique et d'advection (ADAF) ont été d'abord proposés. Puis des variantes impliquant soit des *outflows*, soit un ralentissement de l'accrétion du à la convection, soit des jets ou des composantes non thermiques, ont été suggérés pour rendre compte des observations (Narayan et al. 1998, Melia & Falcke 2001, Melia et al. 2001, Falcke & Markoff 2000). Malgré des avancées remarquables dans ce domaine, la faible luminosité X, l'observation de polarisation linéaire aux fréquences submillimétriques et encore la découverte

spectaculaire des éruptions X de Sgr A* avec Chandra (Baganoff et al. 2001) et avec XMM-Newton (Goldwurm et al. 2003, Porquet et al. 2003) ainsi que des sursauts infrarouges avec le VLT (Genzel et al. 2003) et le Keck (Ghez et al. 2004), ont successivement remis en question les modèles. Aujourd'hui encore, pour le trou noir supermassif le plus proche et le mieux observé, nous n'avons pas un modèle confirmé qui puisse expliquer le faible niveau de son émission X ou la production et les caractéristiques des sursauts X et IR. Nous ne savons pas encore si le mécanisme de base de la production de l'émission est l'accrétion (Liu & Melia 2001) ou l'éjection de matière (Markoff et al. 2001), et quel rôle on peut attribuer aux composantes non thermiques (Yuan et al. 2003).

Dans ce contexte s'inscrit l'effort pour détecter Sgr A* dans les domaines X et gamma et aussi pour détecter des sursauts infrarouge et radio simultanément aux sursauts X. Pendant les sursauts X observés, le spectre de la source durcit et il est possible qu'une composante non thermique s'étende vers les hautes énergies. La mesure de la composante gamma du spectre, par exemple avec INTEGRAL, apporterait des contraintes sévères aux modèles et l'étude détaillée des sursauts X avec XMM pourrait mieux déterminer leur origine.

Comme vu précédemment (Bélanger et al. 2004, Goldwurm et al 2004), nous avons, en 2003, détecté une source proche de Sgr A* avec INTEGRAL. Toutefois, l'interprétation des mesures gamma n'est pas évidente. Dans les 13' (la réponse angulaire d'INTEGRAL) autour de Sgr A*, divers types de sources, dont un reste de supernova atypique (Sgr A East), l'émission X diffuse, des filaments non thermiques et plusieurs sources ponctuelles transitoires, pourraient contribuer au flux observé. La source HESS avait été aussi observée et on espérait trouver une variabilité corrélée entre le deux sources gamma.

Pour mettre en évidence la contribution éventuelle de Sgr A* à cette émission, il restait à essayer de mesurer des variations gamma simultanées aux sursauts X. Nous avons donc proposé un *large project* XMM-Newton (surveillance de la source au cours de 4 orbites, soit $5,5 \cdot 10^5$ s d'exposition) corrélé à des observations INTEGRAL, HESS et une campagne multi longueurs d'onde, de la radio à l'infrarouge, pour :

- poursuivre l'étude des sursauts X avec XMM,
- éventuellement déceler et mesurer le spectre gamma des sursauts X avec INTEGRAL et HESS,
- rechercher des sursauts IR, sub-mm et radio simultanées aux sursauts X,

- connaître l'état des sources transitoires X pour modéliser l'émission vue avec INTEGRAL.

Les programmes d'observation soumis pour l'appel d'offre n°. 3 de XMM (en collaboration avec le MPE, l'université de Leicester et nos collègues américains des universités de Tucson et Evanston) et pour le l'appel d'offre n°. 2 d'INTEGRAL (en collaboration avec, en plus, le laboratoire de Toulouse et de Copenhague) ont été approuvés. Nous avons planifié les observations pour fin mars et fin août 2004 pour essayer d'avoir la meilleure couverture avec des expériences sol (VLT, HESS, VLA). Les équipes de l'ESA en charge des programmations XMM et INTEGRAL se sont coordonnées et la couverture commune, XMM et INTEGRAL, a été très bonne. Malheureusement, le mauvais temps a perturbé les observations VLT et HESS et nous n'avons pas eu une couverture optimale avec les différents télescopes au sol. Malgré les difficultés, un certain nombre de résultats important a été obtenu.

4.8.1 Résultats des observations XMM-Newton

Les résultats des observations 2004 de Sgr A* avec XMM-Newton ont été publiés dans **Bélangier et al., 2005, Repeated X-Ray Flaring Activity in Sagittarius A* (publication n°. 12)**. Nous avons détecté deux nouveaux sursauts X brillants de Sgr A* et plusieurs autres plus faibles. Les observations ont été malheureusement perturbées par des flots de particules chargées d'origine solaire, et nous avons perdu une partie des données en raison du remplissage des mémoires notamment celles de la camera PN d'EPIC. L'analyse des données a été donc spécialement délicate, mais en collaboration avec nos collègues du MPE, nous avons analysé l'ensemble des données XMM des quatre orbites presque complètes d'observation de Sgr A*. Les courbes de lumière à la position de Sgr A* des Fig. 1, 2, 4, et 6 de la publication n°. 12 montrent clairement la présence de pics significatifs.

Nous avons pu démontrer (Fig. 3, publication n°. 12) que ces pics sont localisés à la position de Sgr A* avec une erreur de $\sim 1''$ et ne sont donc pas dus à la nouvelle source transitoire radio et X découverte et localisée par Chandra, en juillet 2004, à seulement $2.9''$ de Sgr A* (Muno et al. 2005). Cette nouvelle source transitoire (CXOGC J174540.0-290031), très proche de Sgr A*, a été observée en radio avec le VLA et elle présente une structure double qui indique la présence probable d'un jet (Bower et al. 2006). Elle est bien visible sur nos données XMM et nous avons pu mesurer avec précision la période orbitale (~ 8 h) et la largeur des éclipses (bien visibles dans la Fig. 2 de la publication n°. 12) de ce système binaire (Porquet et al. 2005). Nous en avons déduit

une limite supérieure sur la masse du compagnon de $\sim 1 M_{\odot}$ et proposé que l'objet compact impliqué soit un trou noir (Porquet et al. 2005).

Par contre les autres structures des courbes de lumière, en particulier les deux grands sursauts de durées respective 2500 s et 5000 s sont attribués à Sgr A^{*}. Nous avons pu reconstruire les spectres et nous avons retrouvé des pentes relativement dures ($\alpha \sim 1,6$ et $1,9$), similaires au deux premiers sursauts de Sgr A^{*}, et des luminosités au pic de $5 \cdot 10^{34} \text{ erg s}^{-1} \sim 40$ fois plus importantes que le niveau de quiescence. Au total nous avons détecté trois sursauts par jour d'intensité au moins quinze fois supérieure à celle mesuré en quiescence. Le taux moyen des événements X moyens/brillants est donc estimé à un par jour, cohérent avec les estimations précédentes et bien inférieures à celle des sursauts infrarouges. Nous avons aussi remarqué que les sursauts semblent apparaître regroupés comme s'il y avait des périodes d'activité.

L'étude de ces nouveaux événements indique que les sursauts de type dur sont bien plus fréquents que les mous. Le seul modèle capable d'expliquer la présence des spectres à la fois durs et à la fois mous est celui développé par Liu et al. (2001, 2003, 2004). Il aurait été certes crucial, pour tester les modèles, de voir comment les spectres se comportent à des énergies $> 10 \text{ keV}$. Notre tentative d'observer les sursauts X dans le domaine X dur avec INTEGRAL n'a malheureusement pas abouti. Les Fig. 9 et 10 de la publication n°. 11 montrent que, comme par le fait du hasard, les deux sursauts X brillants de Sgr A^{*} se sont produits pendant le passage d'INTEGRAL dans les ceintures de radiation. En tout cas, INTEGRAL n'aurait pas pu mesurer le spectre de ces sursauts, même s'il les avait détectés, car il n'est pas assez sensible. Il faudra attendre Simbol-X pour obtenir ce type de résultat (chapitre 5).

4.8.2 Observation simultanée d'un sursaut de Sgr A^{*} en X et en infrarouge

Les autres résultats de la campagne d'observation multi longueurs d'onde organisée en 2004 en coordination avec XMM-Newton ont été recueillis et soumis à publication en collaboration avec nos collègues américains, australiens et japonais (Yusef-Zadeh, et al. 2005). Dans ce papier, nous détaillons l'analyse d'observations menées avec un total de neuf télescopes, spatiaux ou basés au sol. La Fig. 4.13 dresse la liste des observations avec la couverture approximative des périodes de pointage. Le programme incluait aussi des observations avec le VLT et HESS, mais elles n'ont pas pu être menées à bien en raison de mauvais temps et elles ne figurent pas dans la liste.

Les résultats les plus importants sont ceux relatifs aux données HST. Nous avons pointé le télescope spatial Hubble en utilisant l'instrument NICMOS (*Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer*) pendant la deuxième phase de la campagne (fin août à début septembre). Nous avons obtenu 32 orbites complètes d'observation sur 4 jours pendant 6 périodes, avec une visibilité de Sgr A* pendant la moitié de chaque orbite (92 mn), soit des expositions de 2760 s séparées d'intervalles de la même longueur, dans 3 bandes (1,60, 1,87 et 1,90 μm). Les courbes de lumière de Sgr A* (comparées aux courbes stables des étoiles proches) montrent la présence de plusieurs sursauts infrarouges, avec des variations maximales en flux de $\sim 20\%$ et des durées de 2 à 2,5 h. Les données radio, millimétrique et submillimétriques montrent aussi des variabilités intéressantes. Le recouvrement des variabilités n'a pas été optimal, peu de périodes actives ont été couvertes aux différentes fréquences. Nous avons par contre eu la chance d'avoir un recouvrement partiel IR du long sursaut X du 31 août. La Fig. 4.13 présente les courbes de lumière X et infrarouge de cet événement. Le sursaut est clairement visible dans les deux courbes. Le flux IR à 1,6 μm corrigé par rougissement interstellaire (avec $A_H = 4,5$ mag) passe à 10,9 mJy avec une augmentation par rapport au niveau de quiescence de 20 %. Ce qui est vraiment remarquable est que les variations dans les sursauts apparaissent en phase, ce qui a d'importantes conséquences sur l'interprétation des mesures.

En effet, ce n'est pas le premier sursaut détecté simultanément dans les deux domaines de fréquence, car Eckart et al. (2004) avaient déjà présenté une mesure combinée Chandra – VLT d'un événement X / IR. Mais ce sursaut X était vraiment faible et il ne permettait pas d'étudier les structures temporelles avec la richesse de détails visible en Fig. 4.13. Le degré de corrélation que nous observons entre les photons X et IR est tel que l'on peut mettre une limite de ~ 200 s (intervalle temporel des points X) sur le retard entre les variations X et IR. Cette limite implique que la même population d'électrons est probablement responsable de l'émission dans les deux bandes.

Par contre, les spectres IR et X semblent différents. Nous n'avons pas pu mesurer un spectre infrarouge (pas de mesures simultanées à différentes fréquences), mais nous pouvons estimer la pente entre les points IR et les points X. Un tel exercice nous donne un indice de 3,3 bien différent du spectre X ($\sim 1,9$). De plus, les quelques spectres des sursauts infrarouges mesurés avec le VLT ou le Keck sont très rouges (Genzel et al. 2003, Eisenhauer et al. 2005), avec des pentes (en unité F_ν) qui varient entre 2,2 et 3,5 (équivalentes à des indices en photon de 3,2 et 4,5 respectivement). Il serait donc difficile envisager que la même distribution d'électrons qui produit l'infrarouge puisse donner un spectre synchrotron aussi plat dans le domaine X.

De plus, tous les modèles de Sgr A* s'accordent pour une valeur du champ magnétique, dans la zone de production de sursauts, de $\sim 10\text{-}20$ G, et donc pour créer des photons X de 10 keV, le facteur de Lorentz des électrons devrait être de $\sim 10^5$ (soit des électrons de 100 GeV). Pour un tel facteur de Lorentz, le temps de refroidissement synchrotron est de l'ordre d'une dizaine de secondes, bien plus petit que la durée (> 30 mn) des éruptions. Bien sûr, on peut imaginer une accélération continue des particules, mais l'hypothèse d'un mécanisme Compton inverse est sans doute plus attrayante.

La diffusion Compton inverse (à plus hautes énergies) des photons générés par synchrotron, par les mêmes électrons qui les produisent est appelée *synchrotron self Compton* (SSC). La situation la plus probable est que le spectre du submillimétrique à l'infrarouge proche est produit par synchrotron et que le spectre X est dû au Compton inverse des photons sub-mm sur les électrons (~ 1 GeV) qui produisent les sursauts NIR par synchrotron. Si, par contre, comme il semblerait, les pentes sub-mm, IR et X sont différentes, il n'est pas évident d'établir quelle distribution d'électrons est à l'origine des processus radiatifs. Liu et al. (2006) ont montré quel type de distribution pourrait expliquer de tels spectres IR et ont montré aussi comment on peut déduire la dimension et la densité de la zone émissive SSC à partir d'une mesure simultanée des spectres X et IR pendant les sursauts.

Mais ce domaine est en développement rapide. Encore plus récemment, Gielleson et al. (2005) et Ghez et al. (2005b) ont obtenu des spectres IR qui montrent une corrélation significative entre pente et flux IR, même à l'intérieur d'un même événement : le spectre est plus bleu (dur) pour des sursauts plus intenses. Le fait que les spectres soient très rouges quand le flux est bas pose quelques problèmes avec les limites supérieures de l'émission IR moyenne (MIR) de Sgr A*. Pour expliquer les variations en flux et en pente avec cette contrainte en MIR, les auteurs sont obligés de considérer un réchauffement des électrons combiné à des variations *ad hoc* en température et densité du plasma qui permettent de réduire la composante MIR du spectre synchrotron. L'élément important de ce modèle est bien sûr le refroidissement par perte d'énergie synchrotron, mais aussi les variabilités périodiques liées au mouvement képlérien du disque d'accrétion et les effets relativistes et de *boosting* Doppler associés. La difficulté est que ces deux effets agissent sur des échelles temporelles du même ordre de grandeur (~ 20 mn).

Nous arrivons donc tout naturellement au problème, de grande actualité, d'une détection de périodicité de la matière qui orbite le long de la dernière orbite stable du disque d'accrétion autour du trou noir massif du centre de la Galaxie.

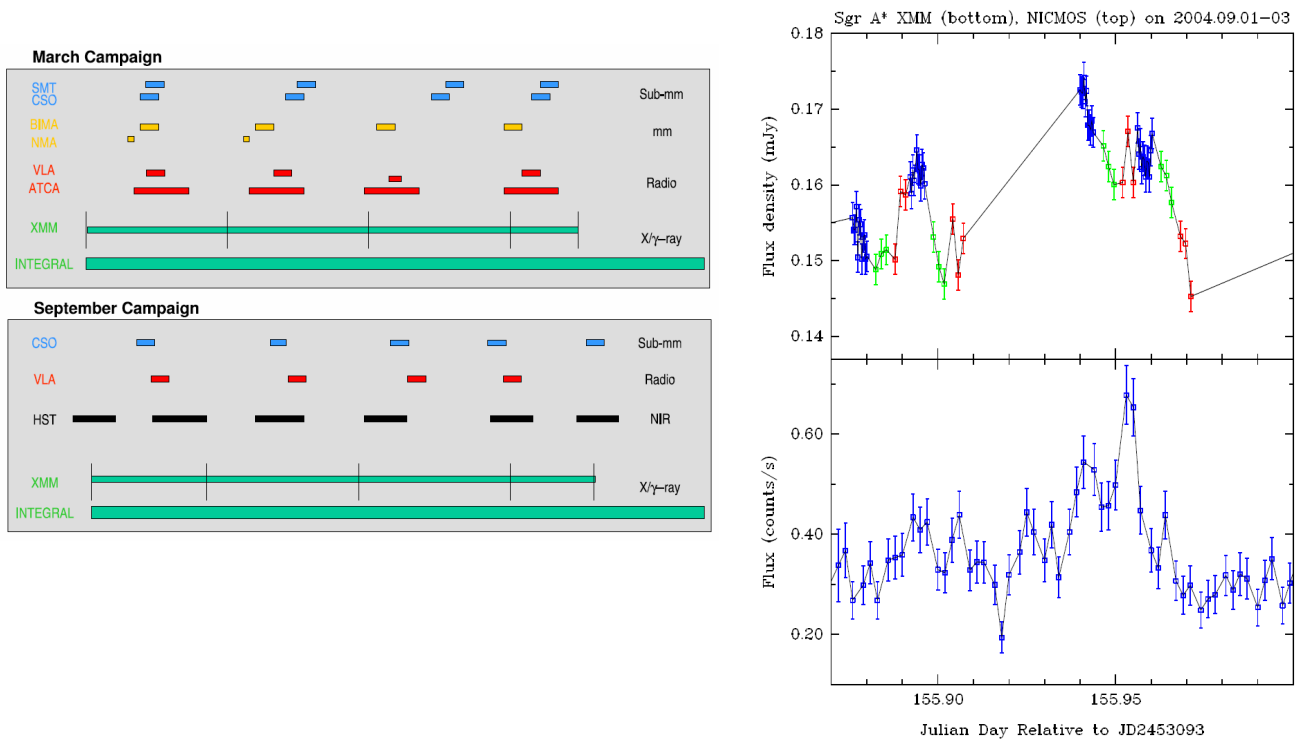


Fig. 4.13 *Gauche* : Programme de la campagne d’observation de Sgr A* réalisée en 2004. *Droite* : Courbes de lumière infrarouges (haut) et X (bas) du sursaut de Sgr A* du 31 août 2004. Les points IR sont à fréquences 1,6 μm (bleu), 1,87 μm (vert) et 1,90 μm (rouge), alors que la courbe de lumière X est dans la bande 2-10 keV.

4.8.3 Quasi-périodicité dans les sursauts X de Sgr A* : un disque plutôt qu’un jet ?

Nous avons vu que tous les indices poussent à localiser l’émission des sursauts X et IR dans les régions très proches de l’horizon du trou noir. Tout porte à dire qu’elles se situent à des distances du trou noir de quelques rayons de Schwarzschild (R_S). Nous ne savons pas encore si la matière qui donne lieu à l’émission est plutôt en état d’accrétion qu’en état d’éjection. Deux modèles s’affrontent donc : le modèle de jet et celui d’un disque d’accrétion.

Une des manières de distinguer entre ces modèles serait d’observer les phénomènes que l’on attend des mouvements orbitaux de la matière qui circule dans un disque d’accrétion. La proximité de la zone émissive de l’horizon laisse à penser que des phénomènes relativistes pourraient être détectables.

Des telles mesures pourraient aussi :

- Permettre de vérifier la relativité générale dans les conditions de champ fort (voir section 1.1).
- Fournir des paramètres cruciaux du système et notamment le spin et la masse du trou noir.

C'est pour ces raisons que la recherche de périodicité dans les sursauts de Sgr A* est actuellement un des sujets clef de la recherche astrophysique sur les trous noirs. Mais il faut aussi reconnaître que ce sujet est très controversé. Nous avons bien évidemment recherché dans les données à notre disposition la présence de quasi périodicité. Nous avons des indications fortes d'une quasi-périodicité de 22,2 minutes dans le sursaut le plus long, celui du 31 août 2004. Ce travail est encore en cours, il me semble cependant important de conclure ce chapitre en mentionnant le contexte afférant.

A l'époque de la publication de la détection de sursauts IR, Genzel et al. (2003), mentionnaient aussi la détection de quasi-périodicité dans deux de ces sursauts. Avec une analyse de Fourier des courbes IR, Genzel et collaborateurs clament donc la découverte de modulation à une période de ~ 17 mn (16.8 ± 2 mn). Cette mise en évidence de quasi-périodicité est évidemment très suggestive. Cependant, l'analyse relatée dans le papier de Genzel et collaborateurs n'est pas très détaillée et la question du bruit rouge (le bruit dans le spectre de puissance produit par la variabilité à longue échelle de la source même) que les auteurs mentionnent comme une source possible de problèmes n'est pas traitée.

La périodicité képlérienne au niveau de la dernière orbite stable (*Last Stable Orbit*, LSO) d'un trou noir sans rotation (de Schwarzschild) d'une masse de $3,5 \cdot 10^6 M_{\odot}$ est de ~ 27 mn. Pour un trou noir de Kerr (en rotation) et un disque en rotation dans le même sens que le trou noir, la LSO se situe à moins de $3 R_S$ (le rayon de la LSO pour un trou noir de Schwarzschild). On trouve qu'au niveau de la LSO d'un trou noir de Kerr, une période orbitale de 17 mn est compatible avec un paramètre de spin $a = J / (GM^2/c)$ de 0,52, soit la moitié du maximum permis. Cette périodicité est, en général, la plus courte possible (avec l'hypothèse que l'émission est produite à la LSO) et elle fournit une limite inférieure au spin.

Aschenbach et al. (2004) ont ensuite analysé les données XMM et Chandra des sursauts X. Ils décrivent l'analyse de Fourier des courbes de lumière X mais, là encore, la question du degré de confiance des pics dans les spectres de puissance n'est pas traitée de façon exhaustive. Sur la base du fait que les pics sont visibles dans les deux sursauts X ou sont proches à des pics des spectres de puissance IR, les auteurs annoncent l'existence de 5 périodes significatives à 100, 219, 700, 1150 et

2250 s. Les auteurs proposent que les 5 périodes observées soient liées aux modes d'oscillation qui se développent dans un disque d'accrétion autour d'un trou noir (voir par exemple Nowak & Lehr 1998). Ils identifient d'abord la deuxième période la plus courte (~ 219 s) avec la période d'orbite Képlérienne au niveau de la LSO. Ils interprètent ensuite les autres périodes comme les périodes d'oscillations epicycliques verticales (692 s) et radiales (1117 s) respectivement au rayon de la LSO et au rayon d'oscillation radiale maximale. Ils déduisent ainsi la masse et le spin du trou noir compatible avec les périodes ainsi définies. Ils trouvent une masse de $2,72 \pm 0,2 \cdot 10^6 M_{\odot}$, proche, mais inférieure, à la dernière estimation de la masse du trou noir du centre galactique, et un spin de 0,9939, soit presque celui d'un trou noir de Kerr parfait.

Malgré le côté suggestif de ces travaux, les détections annoncées ne semblent pas très significatives. Je considère que le plus important serait de confirmer la présence de quasi périodicités dans les sursauts X de Sgr A^{*} avec une estimation sérieuse de la probabilité des tels signaux. Nous avons donc entrepris l'analyse temporelle des données des deux sursauts X observés en 2004 pour la recherche de quasi périodicité. Le premier événement (fin mars) est bien trop court pour rechercher des périodicités de 10-30 mn. De plus, les données étaient perturbées par des éruptions de particules chargées et ne se prêtaient pas à une étude fine de recherche de périodicité. Dans une première analyse du deuxième sursaut, nous avons tout simplement calculé le spectre de puissance et nous avons trouvé une période à 22 minutes qui, en considérant seulement le bruit blanc (dû aux variations Poissonniennes), serait très significative. Toutefois, l'influence du bruit rouge (variation intrinsèque de la source) sur la détermination du degré de confiance des pics dans un spectre de puissance doit être évaluée attentivement. Le travail est en cours et les derniers résultats sont très encourageants et semblent confirmer la période de 22 mn. Nous avons aussi entrepris l'étude des données des sursauts précédents et le résultat qui apparaît d'ors et déjà de ces travaux est que les modulations détectées par Aschenbach et collaborateurs ne seraient pas significatives.

La présentation complète et détaillée de ces recherches se fera dans le cadre de la thèse de Guillaume Bélanger et sera l'objet d'une publication déjà soumise (Bélanger et al. 2006b). Je veux simplement ajouter qu'une période de 22 mn impliquerait (dans l'hypothèse où la zone émissive se situe au voisinage de la LSO) un paramètre de spin de ~ 0.3 . Même si la largeur du signal pourrait nous indiquer une gamme de périodes et donc d'orbites, les valeurs déduites ne sont pas aussi extrêmes que celles évoquées par d'autres auteurs. Certes, la périodicité pourrait avoir une toute autre origine que la signature d'un mouvement orbital proche de la dernière orbite stable du trou noir. Par exemple, les modulations pourraient être dues à des modes d'oscillation dans l'ensemble

du disque (dans le cadre des théories de sismologie de disques relativistes) ou aux développements d'instabilités acoustiques de type Rossby (Tagger & Melia 2006).

En tout cas le disque d'accrétion reste un élément essentiel quant à l'explication de telles périodicités et nos mesures prouveraient donc l'importance majeure de l'accrétion comparée à l'éjection pour le système physique du trou noir au centre galactique. Ceci alimentera le débat sur la nature de l'émission de haute énergie dans les trous noirs galactiques et extragalactiques, car Sgr A* semble aussi (dans sa phase d'activité X) rejoindre la courbe de corrélation $L_R - L_X$ discuté en chapitre 3.6 (Falcke et al. 2004) et donc favoriser un modèle de jet général pour tous les trous noirs accrétants, en contradiction avec le fait que l'émission X soit dominée par le disque.

4.9 Conclusions

Le programme d'étude de l'émission de haute énergie du trou noir super massif de notre galaxie que j'ai mené de 1990 jusqu'à aujourd'hui a donc débuté avec l'observation profonde du bulbe galactique avec SIGMA, a été poursuivi avec des observations XMM-Newton et INTEGRAL, et, plus récemment, avec une vaste campagne multi longueurs d'onde. Avec les résultats apportés par ROSAT, EGRET/GRO, Chandra et HESS (et plus récemment encore par l'observatoire Pierre Auger) ce programme a constitué une contribution importante à l'étude des phénomènes à haute énergies dans la région du centre galactique et plus spécifiquement autour du trou noir supermassif de notre galaxie (Goldwurm 2005).

En 2005, l'année de la constitution officielle (1 janvier 2005) du laboratoire APC Paris (voir chapitre 5), j'ai eu l'occasion d'organiser, dans le cadre du 5^{ème} atelier international de l'APC, une série de séminaires et une conférence internationale (15 - 17 juin 2005) sur le thème *High Energy Phenomena in the Galactic Center*. L'atelier a réuni près de 100 spécialistes du centre galactique et des hautes énergies et ils ont discutés, entre autres, les résultats et les questions ouvertes mentionnés dans les chapitres précédents.

La conférence a été un grand succès ; ce fut l'opportunité de présenter et de discuter nos résultats et l'occasion de rencontres entre étudiants et chercheurs sur le thème des trous noirs galactiques, de l'astrophysique des hautes énergies et de l'astroparticule⁸.

⁸ Voir le site : http://cdfinfo.in2p3.fr/APC_CS/Animation/HEP_GC/

Bibliographie

- Abramowicz, M., et al., 1988, ApJ, 332, 646
Aharonian, F., et al., 2004, A&A 425, L13
Aharonian, F., & Neronov, A., 2005, ApJ, 619, 306
Aharonian, F., et al., 2005, A&A 432, L25
Agol, E., 2000, ApJ, 538, L121
Aitken, D.K., et al., 2000, ApJ, 534, L173
Aschenbach, B., et al., 2004, A&A, 417, 71
Atoyan, A., & Dermer, C.D., 2004, ApJ, 617, 123
Baganoff, F.K., 2001, Nat, 413, 45
Baganoff, F.K., 2003, ApJ, 591, 891
Balick, B. & Brown, R.L., 1974, ApJ, 194, 265
Beckert, T., et al., 199, A&A, 307, 450
Bélanger, G., et al., 2004, ApJ, 601, L163 [A79] (Publication n°. 10)
Bélanger, G., et al., 2005, ApJ, 635, 1095 [A91] (Publication n°. 12)
Bélanger, G., et al., 2006, ApJ, 636, 275 [A93] (Publication n°. 11)
Bélanger, G., et al., 2006b, ApJL, submitted, astro-ph/0604337 [A99]
Belmont, R., et al., 2005, ApJ, 631, L53
Blandford, R., & Begelman, M., 1999, MNRAS, 303, L1
Bower, G.C., 2006, ApJ, 633, 218
Brion, E., et al., 2004, *Conf. Proc. of the SF2A*, EDP-Sciences Conf. S., 385 [C81]
Churazov, E., et al., 1994, ApJ, 443, 341 [A41]
Cocker, R.F. & Melia, F., 1997, ApJ, 488, L149
Cocker, R.F. & Melia, F., 2000, ApJ, 534, 723
Crocker, R. M., et al., 2005, ApJ, 622, 892
Cordier, B., et al., 1991, Adv.Space Res., 11(8), 177 [C9]
Decourchelle, A., et al., 2002, MemSAI, 73, 23
Eckart, A., et al., 2004, A&A, 427, 1
Eisenhauer, F., et al., 2005, ApJ, 628, 246
Falcke, H. & Markoff, S., 2000, A&A, 362, 113
Falcke, H., et al., 2004, A&A, 414, 895
Genzel, R., & Townes, C.H., ARAA, 25, 377
Genzel, R., et al., 2003, Nat, 425, 934
Ghez, A.M., et al., 2004, ApJL, 601, L159
Ghez, A.M., et al., 2005a, ApJ, 620, 744
Ghez, A.M., et al., 2005b, ApJ, 635, 1087
Gillessen, S., et al., 2006, ApJL, 640, L163
Goldoni, P., et al., 1999, A.L&C, 38, 305 [C60]
Goldoni, P., et al., 2004, Mem. S.A.It., 75, 425 [C85]
Goldwurm, A., 2001, ESA - SP, 459, 455 [C67] (Publication n°. 8)
Goldwurm, A., 2005, *Towards a Network of Atmospheric Cherenkov Detectors VII*, 27-29 April 2005 Palaiseau, France, Eds: B. Degrange, G. Fontaine, 297 [C106]
Goldwurm, A., et al., 1994, Nat, 371, 589 [A39] (Publication n°. 7)
Goldwurm, A., et al., 1999, Proc. 19th Texas Symp., 15, 9904104 [C57]
Goldwurm, A., et al., 2003, ApJ, 584, 751 [A66] (Publication n°. 9)
Goldwurm, A., et al., 2003b, *Conf. Proc. of the 2002 GC Workshop*, Astron. Nachr., 324, 377 [C79]

Goldwurm, A., et al., 2004, 4th INTEGRAL Workshop, ESA-SP, 552, 237 [C98]
 Hartman, R.C., et al., 1999, ApJS, 123, 79
 Koyama, K., et al., 1996, PASJ, 48, 249
 La Rosa, T.N., et al., 2000, ApJ 119, 207
 Liu, S. & Melia, F., 2002, ApJ, 566, L77
 Liu, S., et al., 2004, ApJL, 611, L101
 Liu, S., et al., 2006, ApJ, 636, 798
 Lynden-Bell, D. & Rees, M., 1971, MNRAS, 152, 461
 Maeda, Y., et al., 2002, ApJ, 570, 671
 Malet, I., et al., 1995, ApJ, 444, 222
 Markoff, S., et al., 1999, ApJ, 522, 870
 Markoff, S., et al., 2001, A&A, 379, L13
 Mayer-Hasselwander, H., et al., 1998, A&A, 335, 161
 Melia, F., 1992, ApJ, 387, L25
 Melia, F., 1994, ApJ, 426, 577
 Melia, F., & Falcke, H., 2001, ARAA, 39, 309
 Melia, F., et al., 2001, ApJ, 553, 146
 Mezger, P.G., et al., 1996, A&AR, 7, 289
 Morris, M. & Serabyn, E., 1996, ARAA, 34, 645
 Munro, M., et al., 2004, ApJ, 613, 326
 Munro, M., et al., 2005, ApJ, 633, 228
 Narayan, R., et al., 1995, Nat, 374, 623
 Narayan, R., et al., 1998, ApJ, 492, 554
 Nowak, M.A. & Lehr, D.E., 1998, in *Theory of BH Accretion Discs*, Cambridge Univ. press, p. 233
 Park, S., et al., 2005, ApJ, 631, 964
 Porquet, D., et al., 2003, A&A, 407, 17 [A68]
 Porquet, D., et al., 2005, A&A, 443, 571 [A90]
 Predehl, P. & Truemper, J., 1994, A&A, 290, L29
 Proctor, R.J., et al., 1978, MNRAS, 185, 745
 Revnivtsev, M., et al., 2004, A&A, 425, L49
 Revnivtsev, M., et al., 2006, A&A, 452, 169
 Sakano, M., et al., 2004, MNRAS, 350, 129
 Schoedel, R., et al., 2002, Nat, 419, 694
 Schoedel, R., et al., 2003, ApJ, 596, 1015,
 Shakura S. & Sunyaev, R., 1973, A&A, 24, 337
 Skinner, G. K., et al., 1987, Nat, 330, 544
 Sunyaev, R., et al., 1991, A&A, 247, L29 [A11]
 Tagger, M. & Melia, F., 2006, ApJ, 636, 33
 Tanaka, Y., et al., 2000, PASJ, 50, L52
 Valinia, A., et al., 2000, ApJ, 543, 733
 Vargas, M., et al., 1996, ASP Conf, 102, 431 [C44]
 Watson, M.G., et al., 1981, ApJ, 250, 142
 Yuan, F., et al., 2002, A&A, 383, 854
 Yuan, F., et al., 2003, ApJ, 598, 301
 Yuan, F., et al., 2004, ApJ, 606, 894
 Yusef-Zadeh, F., et al., 2006, ApJ, 644, 198 [A95]

Publications présentées

Le trou noir au centre de la Galaxie (VIII-4)

- 7 Possible Evidence against a Massive Black Hole at the Galactic Centre**
A. Goldwurm, B. Cordier, J. Paul, J. Ballet, L. Bouchet, J.-P. Roques, G. Vedrenne, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Finogenov, A. Vikhlinin, A. Dyachkov, N. Khavenson, & V. Kovtunenkov,
1994, *Nature*, V. 371, p. 589. (n^o. citations : 58).
- 8 The Center of our Galaxy: Activity and High-Energy Emission of the Closest Massive Black Hole**
A. Goldwurm,
2001, *Proc. of the 4th INTEGRAL Workshop*, 4-8 Sep 2000, Alicante, Spain, Eds. A. Gimenez, V. Reglero, C. Winkler, ESA SP - 459, 455.
- 9 A New X-Ray Flare from the Galactic Nucleus Detected with the XMM-Newton European Photon Imaging Cameras**
A. Goldwurm, E. Brion, P. Goldoni, P. Ferrando, F. Daigne, A. Decourchelle, R. S. Warwick, P. Predehl,
2003, *The Astrophysical Journal*, 584, 751. (n^o. citations : 47).
- 10 INTEGRAL Detection of Hard X-Ray Emission from the Galactic Nuclear Region**
G. Bélanger, A. Goldwurm, P. Goldoni, J. Paul, R. Terrier, M. Falanga, P. Ubertini, A. Bazzano, M. Del Santo, C. Winkler, A.N. Parmar, E. Kulkeers, K. Ebisawa, J.P. Roques, N. Lund, F. Melia
2004, *The Astrophysical Journal Letters*, 601, L163.
- 11 A Persistent High-Energy Flux from the Heart of the Milky Way: Integral's view of the Galactic Center**
G. Bélanger, A. Goldwurm, M. Renaud, R. Terrier, F. Melia, N. Lund, J. Paul, F. Yusef-Zadeh
2006, *The Astrophysical Journal*, 363. 275
- 12 Repeated X-ray Flaring Activity in Sagittarius A***
G. Bélanger, A. Goldwurm, F. Melia, F. Yusef-Zadeh, P. Ferrando, D. Porquet, N. Grosso, R. Warwick
2005, *The Astrophysical Journal*, 635, 1095

Possible evidence against a massive black hole at the Galactic Centre

A. Goldwurm*, B. Cordier*, J. Paul*, J. Ballet*, L. Bouchet†, J.-P. Roques†, G. Vedrenne†, P. Mandrou†, R. Sunyaev‡, E. Churazov‡, M. Gilfanov‡, A. Finoginov‡, A. Vikhlinin‡, A. Dyachkov‡, N. Khavenson‡ & V. Kovtunenkov‡

*CEA/DSM/DAPNIA/Service d'Astrophysique, Centre d'Etudes de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

†Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, 9, avenue du Colonel Roche, BP 4346, 31029 Toulouse Cedex, France

‡Space Research Institute, Profsoyuznaya, 84/32, Moscow 117296, Russia

THE centre of our Galaxy is known to contain a large condensation of mass¹, and it has been suggested that a massive black hole (of several million solar masses) is located there. Massive black holes have been proposed to explain active galactic nuclei, and if the Galactic Centre is a less-powerful version of such sources it should radiate X-rays and γ -rays¹. But although earlier observations²⁻⁶ have shown that the region does emit X-rays and γ -rays, the true centre, corresponding to the object Sagittarius A*, does not emit strongly at least up to energies of 30 keV (refs 4-6). Whether Sgr A* emits radiation at higher energies, however, was not resolved. Here we present the results of a deep imaging survey of the Galactic Centre, performed with the Sigma/GRANAT telescope. We determine the locations of the nine hard X-ray sources—six of them being observed for the first time in the spectral band—to an accuracy of about 2 arcmin, but find no source associated with Sgr A*. The hard X-ray luminosity of Sgr A* is a factor of 4×10^7 less than that expected for a black hole of a million solar masses accreting gas at the maximum stable rate, challenging the idea that there is a black hole at the Galactic Centre.

Since its launch aboard the Russian GRANAT spacecraft on 1 December 1989, the French telescope Sigma⁷ has observed twice per year the Galactic Centre region in the 35–1,300 keV band. The Sigma imaging performances are obtained by the combination of a position-sensitive γ -ray camera, composed of a single NaI crystal, and a URA tungsten coded mask placed above the detector plane. The telescope angular resolution is ~ 15 arcmin, but point sources can be located with an accuracy of 30 arcsec to 5 arcmin, depending on the signal-to-noise ratio. Its large field of view, up to $18.0^\circ \times 16.7^\circ$ at zero sensitivity, and the large amount of observing time available allowed us to map large regions of the sky in hard X-rays and soft γ -rays with unprecedented precision. Our first observations of the Galactic Centre substantiated the results obtained by the two balloon-borne experiments GRIP and EXITE suggesting that IE1740.7–2942 was visible up to 100 keV (refs 8, 9), and clinched its identification as the major source of high-energy emission in the central 1° (refs 10, 11), and even as a possible site of positron production¹²⁻¹⁴. Sigma also discovered the very hard source GRS1758–158 (ref. 15), and detected flares of hard radiation from several other well known X-ray sources in the region.

We have recently refined the procedures for analysing Sigma images¹⁶ and re-analysed all the data collected by Sigma from the $\sim 18^\circ \times 17^\circ$ region around the Galactic Centre, between 24 March 1990 and 14 October 1993. (A total of 109 observing periods, for an effective dead-time-corrected integration time of 1,752 hours, have been analysed.) This unprecedented survey of the Galactic Centre region, spanning nearly 4 years, has yielded the most precise images available beyond 35 keV, with a typical 1σ flux error in the adopted energy bands of $< 2-3$ mCrab (1 mCrab corresponds to 8.0×10^{-12} erg cm⁻² s⁻¹ in the 35–75 keV band and to 6.9×10^{-12} erg cm⁻² s⁻¹ between 75 and 150 keV). The resulting images in the 35–75 keV and 75–150 keV bands are displayed in Fig. 1. The low-energy image (Fig. 1a) shows a cluster of well-separated sources detected above the 5σ level. Their estimated positions and average fluxes are given in Table 1, along with their proposed identifications¹⁷⁻²¹. Note that the strongest one is the hard X-ray nova which we discovered in Ophiuchus on 25 September 1993 (ref. 17). While flaring it

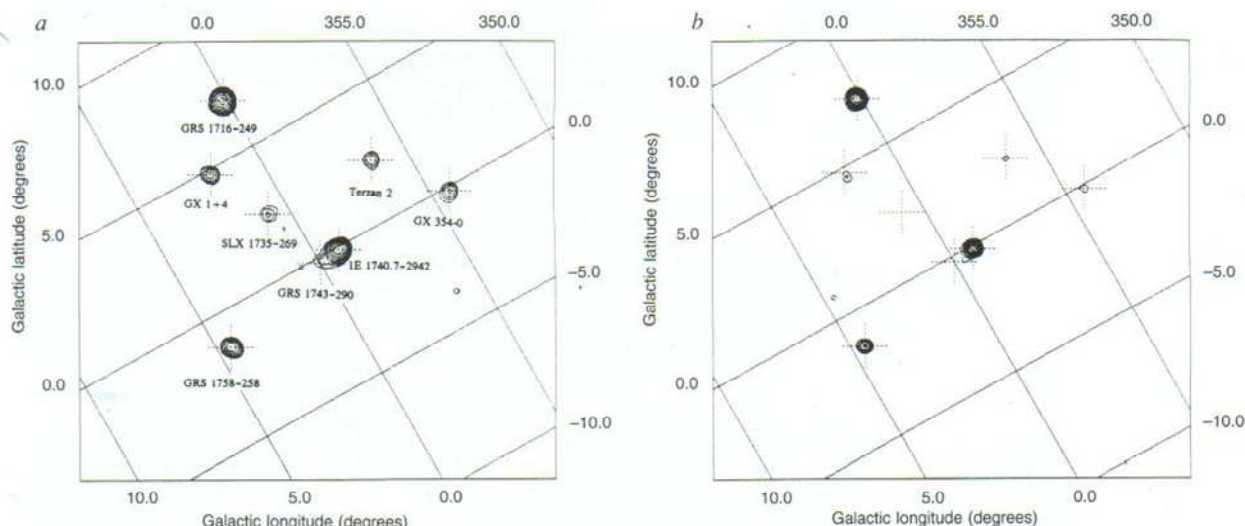


FIG. 1 Images of the $18.0^\circ \times 16.7^\circ$ sky region around the Galactic Centre as seen by the Sigma/GRANAT telescope after nearly 4 years of operation in the 35–75 keV (a) and the 75–150 keV (b) bands. Images, after standard corrections and deconvolution, have been smoothed with the telescope PSF and summed. Contour levels are in units of local standard deviations (σ), starting at 4.5σ and logarithmically spaced by a factor 1.382 (4.5σ , 6.2σ , 8.6σ , ..., 60σ). The sensitivity is not uniform along the image, being maximal around the Galactic nucleus and decreasing regularly to 15% of the maximum at the edges. Crosses indicate positions of the detected sources. For clarity, the position of A1742–294 is not reported (see Fig. 2).

LETTERS TO NATURE

TABLE 1 Sources detected in Galactic Centre survey

Source Sigma reference	Sigma position (1950 equinox)			Err. rad. 90% c.l.	Fluxes and 1σ upper limits (mCrab)			Nature
	RA (h min s)	Dec. ($^{\circ}$ ' ")			35–75 keV	75–150 keV	HR	
GRS1716–249*	17 16 34	–24 57 45	1.0'		139.0 \pm 2.8	175.8 \pm 3.3	1.3	Black hole candidate
(ref. 17)	–24 57 45							
Terzan 2	17 24 13	–30 44 37	1.8'		21.7 \pm 1.9	12.1 \pm 2.2	0.6	X-ray burster
(ref. 18)	–30 44 37							
GX354–0	17 28 47	–33 47 47	1.7'		25.8 \pm 2.1	13.5 \pm 2.4	0.5	X-ray burster
(ref. 19)	–33 47 47							
GX1+4	17 29 03	–24 42 18	1.5'		29.2 \pm 2.1	12.2 \pm 2.4	0.4	Accreting X-ray pulsar
(ref. 19)	–24 42 18							
SLX1735–269	17 35 13	–26 58 38	3'		14.8 \pm 1.6	5.2 \pm 1.9	0.4	Neutron star?
(ref. 11)	–26 58 38							
1E1740.7–2942*	17 40 42	–29 43 23	27"		65.5 \pm 1.6	69.9 \pm 1.9	1.1	Black hole candidate
(ref. 11)	–29 43 23							
A1742–294*	17 42 43	–29 29 06	5'		8.0 \pm 1.6	4.9 \pm 1.9	0.6	X-ray burster
(ref. 21)	–29 29 06							
GRS1743–290	17 43 10	–29 02 22	4'		10.1 \pm 1.6	<1.9	<0.2	Neutron star?
(ref. 15)	–29 02 22							
GRS1758–258*	17 58 07	–25 44 30	40"		42.2 \pm 2.2	40.4 \pm 1.9	1.0	Black hole candidate
(ref. 15)	–25 44 30							

Positions, intensities and hardness ratio (HR) of sources detected by Sigma/GRANAT in the Galactic Centre survey. Positions (right ascension, RA; declination, dec.) with their 90% confidence level (c.l.) error radius (err. rad.) in 2 parameters have been estimated in the present work from the data of Fig. 1a, except for sources labelled with an asterisk, in which cases we retained the more precise position reported in the reference quoted in the first column.

was so bright (~ 1 Crab) that even averaging over the whole 1990–93 period, its significance remains the highest.

The 35–75 keV emission detected in the central 1° radius circle in Fig. 1a, although dominated by 1E1740.7–2942, is not compatible with the telescope point spread function (PSF), suggesting the presence of multiple sources. Inspection of images in different periods allowed us to resolve the residual signal from two other variable point sources. Part of it is due to the emission of the close (~ 30 arcmin) X-ray burster A1742–294 in autumn 1992 and 1993 (ref. 21). The remaining signal can be associated with a new source, localized east of Sgr A*, which was brighter in 1991 (~ 20 mCrab) and probably active also in 1990 and beginning of 1992. By using the images collected in 1991, when

1E1740.7–2942 was particularly weak¹¹ and A1742–294 not visible at all, we could unambiguously localize this excess. As shown in Fig. 2, it appears at 5.7σ , with a shape compatible with the PSF, and well separated from 1E1740.7–2942. The estimated position of this new source, GRS1743–290, as derived from this image by fitting the two sources simultaneously, is given in Table 1. The 90% confidence level error box of 4.0 arcmin size (in two parameters) is not significantly influenced by the presence, ~ 50 arcmin away, of 1E1740.7–2942. Sgr A* is the closest known >3 keV source to GRS1743–290, but the offset (~ 9.4 arcmin) appears much too large to identify it with the new source. The radio transient detected late in 1990 (ref. 22) is also too far away, and the closest Einstein source³ (1E1742.7–2902) is an implausible candidate because of its weakness and softness. The fact that no counterpart of GRS1743–290 is visible in the maps obtained by the ART-P telescope aboard GRANAT in 1991 (ref. 6) suggests that this source could be deeply embedded in, or behind, a dense molecular cloud. Using a $E^{-\alpha}$ power-law spectrum with $2 < \alpha < 3$ (typical of ART-P sources), column densities in the range $(1.6-4) \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ are needed to reduce the extrapolated 8–20 keV flux below the 3σ ART-P sensitivity. Such column density can be provided by the dense part of the Sgr A complex, positioned along the line of sight of the source as indicated by infrared observations²³. Part of the scattered source flux must actually escape the cloud and contribute to the 7–20 keV diffuse emission of the region, which was recorded by ART-P in 1990 (ref. 24).

Out of the ~ 60 sources known to populate the observed region in the 2–20 keV band at the beginning of the Sigma survey, only 6 have been clearly detected beyond 35 keV in our long exposure. With the exception of the hard X-ray nova in Ophiuchus, the sources listed in Table 1 are probably responsible for the bulk of the hard X-ray emission observed in the region in the past 20 years. On the basis of the hardness ratio—the ratio between the 75–150 keV and the 35–75 keV count rates (see Table 1)—they can be classified in two distinct groups. The hard group, for which the hardness ratio ≥ 1 , includes the three brighter sources, all potential black hole candidates, because of the similarity of their spectra with that of Cygnus X-1, the most popular black hole candidate. Indeed, hard spectra going well beyond 100 keV have been considered as spectral signatures of black holes. The basic argument is that the high temperatures required (for

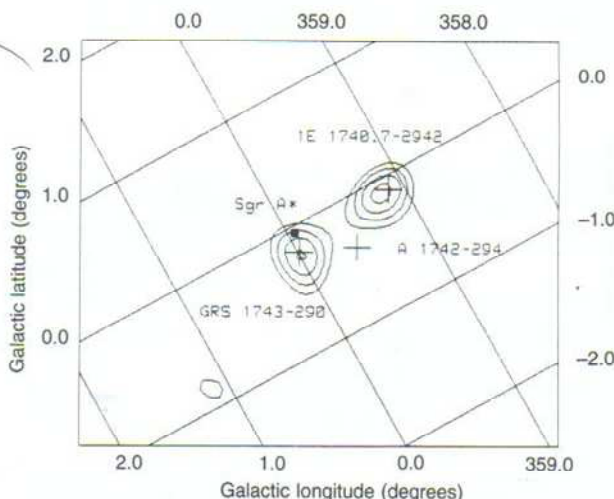


FIG. 2 Image of the sky region around the Galactic nucleus in the energy band 35–75 keV as seen by Sigma during 1991. Contour levels are in units of local standard deviations at 3.25σ , 4.00σ , 4.75σ and 5.5σ . Crosses indicate the best estimates of the positions of 1E1740.7–2942, A1742–294 and the fitted position of the new source (GRS1743–290). The position of Sgr A* is shown by a filled square.

example, the electron temperature of a hot plasma generating hard radiation by Compton collisions) cannot be easily maintained in neutron star systems where strong, low-energy emission from the star surface would cool the plasma by Compton scattering¹⁰. The soft group (hardness ratio ≤ 0.6), includes four genuine neutron-star binaries: one accreting X-ray pulsar, and three X-ray bursters. These sources have already been reported to feature sporadic hard X-ray emission, but our analysis shows now that they must actually be considered nearly persistent sources of hard X-rays, systematically fainter and softer than black hole candidates. Using the estimate of the hardness ratio as a criterion to distinguish the nature of hard X-ray emitting compact objects, we propose that the two sources SLX1735–269 and GRS1743–290 are also accreting neutron stars. Note also that the sporadic broad high-energy feature observed on three occasions by Sigma from 1E1740.7–2942 (refs 12–14) and probably related to positron annihilation processes substantiates the hypothesis of the black-hole nature of this source.

An important result of the Sigma deep survey of the Galactic Centre is that the Galactic nucleus is silent above 35 keV. Although in the 75–150 keV band, the 1990–93 average luminosity is definitely $< 2.4 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ (2σ upper limit for a distance of 8.5 kpc), it is more difficult to determine such a compelling limit in the 35–75 keV band, because of the presence of the nearby source GRS1743–290. Although we can reject the hypothesis that Sgr A* is the counterpart of GRS1743–290 (probability $< 10^{-5}$ for two degrees of freedom), the upper limit of the 35–75 keV luminosity of the Galactic nucleus cannot be set below $3.5 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$. These limits can be compared to the nearly contemporary data obtained by ART-P during autumn 1990 (ref. 6). The rather flat spectrum ($\alpha = 1.6$) of Sgr A* measured by ART-P (and extrapolated to the adopted Sigma energy bands) implies luminosities respectively 3 and 5.7 times higher than the quoted upper limits in the 35–75 and the 75–150 keV bands. Even considering the uncertainties in the ART-P spectrum, our data imply a break in the Sgr A* X-ray spectrum at a critical energy, probably between 20 and 40 keV. As a consequence, the total 3–150 keV luminosity of Sgr A* cannot exceed $2.5 \times 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$, a value which must be compared to the Eddington luminosity of a black hole of 10^6 solar masses that is, $\sim 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$. In the hypothesis that a massive black hole at the Galactic nucleus accretes matter from the close ($\sim 0.04 \text{ pc}$) hot star cluster IRS156 via powerful stellar winds, the limit on the black hole mass which can be derived from our hard X-ray upper limits, and from the break we predict in the X-ray spectrum, is still rather controversial^{25,26}, because it depends strongly on the assumptions made about the model and radiation mechanisms. Our results definitely show that if an accreting massive black hole resides at the Galactic nucleus, it does not efficiently convert to hard X-ray and soft γ -rays the potential energy provided by accretion of the IRS16 star-cluster wind, and it clearly does not behave like a scaled-down active galactic nucleus. In addition, past detection of a variable narrow 511 keV line emission from the Galactic Centre region, although not localized, has often supported the belief that a massive black hole resides in the Galactic nucleus¹. The lack of 511 keV line detection from the Galactic nucleus itself—a Sigma upper limit of $2.45 \times 10^{-4} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ has been obtained for both 1E1740.7–2942 and Sgr A* (ref. 27)—does not rule out the possible presence of a weak compact variable 511 keV source, but certainly implies that the Galactic nucleus remains underluminous at the electron-positron annihilation energy. \square

7. Paul, J. et al. *Adv. Space Res.* **11**, 289–302 (1991).
8. Cook, W. R. et al. *Astrophys. J.* **372**, L75–L78 (1991).
9. Covault, C., Manandhar, R. & Grindlay, J. *Proc. 22nd Int. Cosmic Ray Conf. Dublin Vol. 1* 21–24 (1991).
10. Sunyaev, R. et al. *Astr. Astrophys.* **247**, L29–L32 (1991).
11. Cordier, B. et al. *Astr. Astrophys.* **272**, 277–284 (1993).
12. Bouchet, L. et al. *Astrophys. J.* **383**, L45–L48 (1991).
13. Sunyaev, R. et al. *Astrophys. J.* **383**, L49–L52 (1991).
14. Cordier, B. et al. *Astr. Astrophys.* **275**, L1–L4 (1993).
15. Gilfanov, M. et al. *Astrophys. J.* **418**, 844–849 (1993).
16. Goldwurm, A. in *Proc. of Capri Workshop on Imaging in High Energy Astronomy* (eds Bassani, L. & Di Cocco, G.) (Bologna, Italy, in the press).
17. Gilfanov, M. et al. in *Proc. 4th A. Astr. Maryland Conf. College Park, Maryland, USA* (in the press).
18. Barret, D. et al. *Astrophys. J.* **379**, L21–L24 (1991).
19. Claret, A. et al. *Astrophys. J.* **423**, 436–440 (1994).
20. Laurent, P. et al. *Astr. Astrophys.* **278**, 444–448 (1993).
21. Churazov, E. et al. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **92**, 381–385 (1994).
22. Zhao, J. et al. *Science* **255**, 1538–1543 (1992).
23. Cox, P. & Laureijs, R. in *The Center of the Galaxy* (ed. Morris, M.) 121–128 (IAU Kluwer, Symp. No. 136, Dordrecht, 1989).
24. Markevitch, M., Sunyaev, R. A. & Pavlinsky, M. N. *Nature* **364**, 40–42 (1993).
25. Mastichiadis, A. & Ozerov, L. M. *Astrophys. J.* **426**, 599–603 (1994).
26. Melia, F. *Astrophys. J.* **426**, 577–585 (1994).
27. Malet, I. et al. *Astrophys. J.* (in the press).

ACKNOWLEDGEMENTS. We acknowledge the vital contribution of the CNES Toulouse Space Centre to this work, and thank the staff at the Lavochine Space Company, the Babakin Space Centre, the Baikonour Space Centre and the Evpatoria Ground Station for their unfailing support.

Received 1 June; accepted 8 September 1994.

1. Genzel, R. & Townes, C. H. A. *Rev. Astr. Astrophys.* **25**, 377–423 (1987).
2. Gehrels, N. & Tueller, J. *Astrophys. J.* **407**, 597–605 (1993).
3. Watson, M. G., Willingale, R., Grindlay, J. & Hertz, P. *Astrophys. J.* **250**, 142–154 (1981).
4. Skinner, G. K. et al. *Nature* **330**, 544–547 (1987).
5. Hertz, P. & Grindlay, J. E. *Astrophys. J.* **278**, 137–149 (1984).
6. Pavlinsky, M. N., Grebenev, S. A. & Sunyaev, R. *Astrophys. J.* **425**, 110–121 (1994).

THE CENTER OF OUR GALAXY: ACTIVITY AND HIGH-ENERGY EMISSION OF THE CLOSEST MASSIVE BLACK HOLE

A. Goldwurm

Service d'Astrophysique /DAPNIA/DSM/CEA - Saclay, 91191 Gif sur Yvette Cedex, France

Abstract

The Center of our Galaxy is a peculiar region where a number of crucial astrophysical phenomena take place, from star formation to SN explosions and accretion onto a massive black hole. The quest for a massive black hole in the Galactic Nucleus is of course of particular relevance because, it would be the closest of such extreme objects, which are now believed to reside in most of the galactic nuclei of the universe. I will review here the main observational characteristics of the Galactic Center with particular attention to the the problem of existence, physical condition and activity of the $3 \cdot 10^6 M_{\odot}$ black hole coincident with the compact radio source Sgr A*. I will report historical and recent results of high energy observations of the central degree of our Galaxy, along with the specific accretion models proposed to account for the apparent lack of high energy activity from Sgr A*. The scientific perspectives of the next X and γ -ray missions in the domain of the Galactic Center physics are also mentioned.

Key words: Galactic Center; Black Holes; Sgr A*.

1. Introduction: the Nuclear Bulge

Already in the decade 1920-1930 it was observed that the globular clusters are distributed with spherical symmetry around a point located in the Sagittarius constellation and also that stars were rotating around the same point of the sky. We now know that the dynamical center of the Galaxy is indeed located in Sagittarius, at about 8 kpc from the Sun, right in the middle of the Milky Way. The Sun also lies on the galactic plane and the Galactic Center (GC) is highly absorbed by all the galactic disk dust which intercepts the line of sight. Optical, UV and soft X-rays are therefore totally masked by an absorption of $A_V \approx 31$ mag corresponding to a column density $N_H \approx 6 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, and the study of the central regions can be carried out only from radio to near infrared (NIR) frequencies or at energies > 1 keV.

The recently published VLA pictures at 90 cm (La Rosa et al. 2000) (Fig. 1) show the richness and complexity of the Galactic Center region. In the central $600 \text{ pc} \approx 4^\circ$ (at 8 kpc $1'' \approx 0.04 \text{ pc}$), a sky area often referred as the Nuclear Bulge, the interstellar matter (ISM) is concentrated in a narrow layer (50 pc) of molecular gas for a total mass of $\approx 10^8 M_{\odot}$. Half of this gas forms dense, cold Giant Molecular Clouds (GMC), the denser of which are Sgr B, Sgr C, Sgr D and those in the Sgr A complex. They have typical densities of $\approx 10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$ and temperatures of 30–200 K. Several Supernova Remnants (SNR) are visible in the picture along with other filaments and structures of non-thermal emission, like the prominent Radio Arc, a filamentary source crossing the galactic plane.

A number of thermal radio structures are also present, like the Bridge, which is connecting the Arc to the Sgr A complex. Some are identified with HII regions, like the features named Pistol and Seiklo, whose gas is ionized by young hot stellar clusters, like Quintuplet and Arches. Magnetic fields are strong ($\approx 2 \text{ mG}$) compared to typical values of the galactic disk ($\approx 10 \mu\text{G}$) and lines are perpendicular to the galactic plane in the intercloud gas and parallel to the plane in the GMCs. Cloud kinematics indicates large velocity fields and a general inflow towards the center with rate of $\approx 10^{-2} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Stellar content of the Nuclear Bulge is basically an extension of the Galactic Bulge population. It is dominated by a central nearly-isothermal cluster of low-intermediate mass stars, of metallicity ≈ 2 , with density increasing towards the GC with decreasing radius as $R^{-1.8}$, from $R \approx 100 \text{ pc}$ down to a core radius $R_c \approx 0.1 \text{ pc}$ where the star density reaches a constant value of $\approx 10^7 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ and the mass a core value of $M_c \approx 10^5 M_{\odot}$. However, unlike the Galactic Bulge, this old-middle age (1-10 Gyr) population coexists with a young (10^7 - 10^8 yr) population of massive stars whose total fraction increases towards the center and whose presence indicates recent star formation.

In the following I will describe results obtained for the inner 50 pc and from high energy observations of the central degree. For extensive reviews see Mezger et al. (1996) and Morris & Serabyn (1996), while for recent results see Vol. 186 of ASP Conf. Series (eds. Falke et al. 1999) and Yusef-Zadeh et al. (2000).

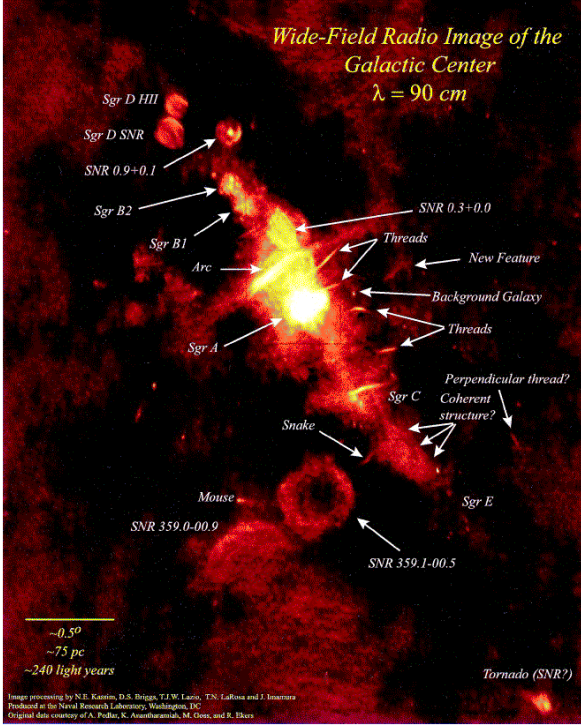


Figure 1. Very Large Array (VLA) image at 90 cm of the Nuclear Bulge.

2. The Sgr A Radio and Molecular Complex

The central 50 pc (20') are dominated by the Sgr A radio complex (Fig. 2, from Yusef-Zadeh et al. 2000). Relevant components of the Sgr A complex are, listing from the outside to the inner regions: several dense molecular clouds, the non-thermal Sgr A East source, the CircumNuclear Disk (CND), the thermal source Sgr A West and the compact source Sgr A*. A recent study of molecular gas velocities of the region (Coil & Ho 2000) describes the morphology and distribution of matter of the complex. Two dense molecular clouds account for most of the ISM of the region, interact with, and probably supply matter to the inner central region. M-0.02-0.07, also known as the 50 km s⁻¹ cloud, lies on the north-east side of the GC and includes the Sgr A East Core very dense MC (15 pc size and 2 10⁵ M_⊙ mass) observed to surround Sgr A East from behind the GC. It is connected by a molecular ridge to the North side of the other cloud, M-0.13-0.08 (the 20 km s⁻¹ cloud), which is located South-East of the GC, about 10 pc in front of it and which seems to supply the CND of molecular gas through the so called “southern streamer”. M-0.02-0.07 and its molecular ridge are compressed by the expanding shell of Sgr A East. Sgr A East is a non-thermal source composed by a diffuse halo of triangular shape (7' × 10') and an oval shell (7 pc × 9 pc i.e. 3' × 4') with major axis parallel to the galactic plane and centered about 50'' (≈ 2 pc) west of Sgr A*. The shell appears in expansion, compressing the cloud and probably creating the string of 4 HII regions at the border with M-0.02-0.07 and the OH masers also observed around the shell.

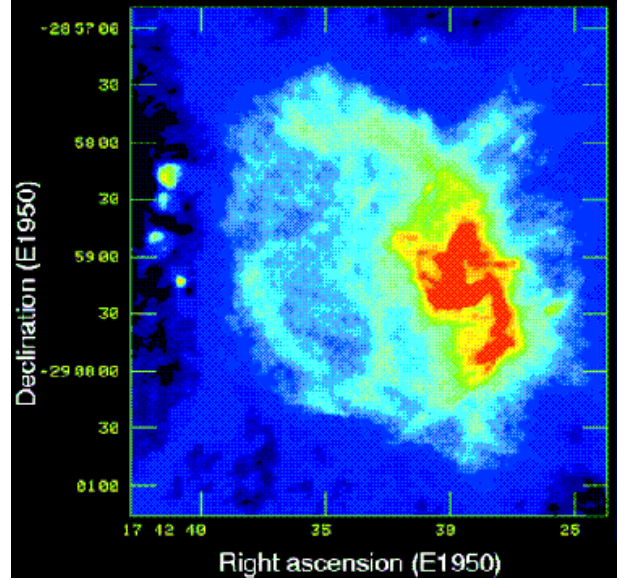


Figure 2. VLA (6 cm) images of Sgr A East halo (blue) and shell (light blue), the inner thermal minispiral (red) and the 4 HII regions on the East side.

A life time of 5 10⁴ - 10⁵ yr and a total explosion energy of 4 10⁵² ergs were derived from the source radio brightness and expansion velocity. 40 nearly simultaneous SN are needed to account for this energy and other scenarios have been proposed to explain Sgr A East energetics, including the explosive tidal disruption of a 1 M_⊙ star by the central massive black hole. Between 1.7–7 pc (40''–175'') from the center lies the CND a clumpy, asymmetrical torus of neutral molecular gas and dust rotating ($V_R \approx 100$ km s⁻¹) around Sgr A West. The CND mass is 10⁴ M_⊙, the gas temperature ≥ 100 K and it is observed in molecular transition lines (e.g. HCN) and also in infrared wavelengths, emitted by the dust heated by radiation coming from the central cavity. Its inner part has the shape of a ring whose edges bound the central cavity and the thermal source Sgr A West. The HII region Sgr A West was unambiguously separated by the non-thermal emission of Sgr A East in 1975, while the inner minispiral pattern was discovered in 1983 with the VLA. The bulk of the ionized gas (250 M_⊙) appears as extended emission of size 2.1 pc × 2.9 pc with average density $n_e \approx 10^3$ cm⁻³, in which is embedded the denser *minispiral*, a 3 armed spiral structure (Fig. 3) orbiting around the GC, composed by northern and eastern arms, a central bar and a western arc. The radio spectrum resembles that of a typical optically thin HII region with $T_e \approx 6000$ K, emission measure $\approx 2 \cdot 10^3$ pc cm⁻⁶ and ionization temperature $T \approx 3 \cdot 10^4$ K. These parameters imply the presence of a ionizing source of UV luminosity $L_{UV} \approx 7.5 \cdot 10^{37}$ erg s⁻¹ and total flux of Lyman continuum photons $N_{Ly\gamma} \approx 1.2 \cdot 10^{50}$ ph s⁻¹. Recombination emission lines allowed detailed kinematic studies of the gas, which show that Sgr A West is rotating from north-east to south-west and then towards north-west. This seems to imply that the western arc is the ionized edge of the CND, the N and E arms are

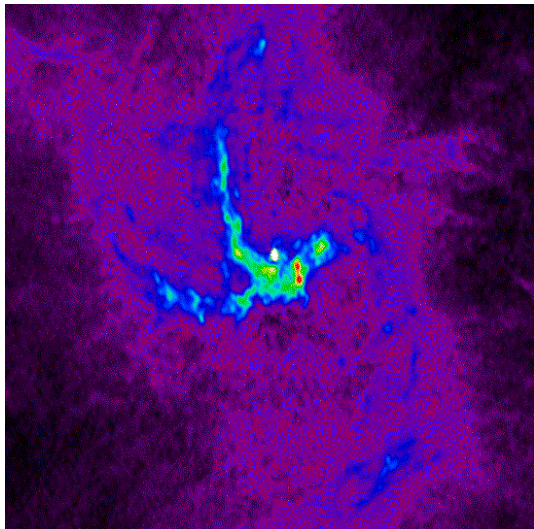


Figure 3. Sgr A West minispiral observed with the VLA at 1.2 cm. The central white spot is Sgr A*.

tidally stretched streams of infalling gas and the bar is an extension of the N arm. Sgr A West is seen in front of Sgr A East and Sgr A East Core cloud but is behind the 20 km s^{-1} molecular cloud. Little north of the minispiral central bar and visible as a white point in Fig. 3 lies the compact source Sgr A* which must be seen in front of the minispiral bar even if embedded in the diffuse ionized cloud.

3. The Compact Radio Source Sgr A*

Sgr A* was discovered by Balick & Brown (1974), 3 years after Lynden-Bell & Rees (1971) had predicted that a compact synchrotron radio source should reveal the presence of a massive black hole (MBH) in the Galactic Nucleus. Sgr A* is indeed a compact, bright, non-thermal radio source, which coincides (within 50 mas) (Ghez et al. 2000) with the dynamical center of the Galaxy. The radio spectrum (Fig. 4) is an inverted power-law ($S_\nu \propto \nu^\alpha$) with spectral index $\alpha \approx 0.33$ between 1 GHz and 800 GHz, and with low and high frequency cut-offs. Flux variability of 30-100%, around a value of $\approx 1 \text{ Jy}$, on timescales of few months is observed, and the average radio luminosity is estimated to $\approx 300 L_\odot$. The source is also very static, an upper limit of 20 km s^{-1} has been set to its proper motion. Considering the high velocities of the stars of the region ($500\text{-}1000 \text{ km s}^{-1}$) this unusual low value indicates that Sgr A* must be massive. A lower limit of $1000 M_\odot$ to its mass was indeed derived, excluding the possibility of a stellar object. The apparent radio size of Sgr A* increases with wavelength as λ^2 , which is the sign of source broadening due to ISM electron scattering. However at low enough λ ($< 7 \text{ mm}$) the relation seems to flatten and the source is probably resolved by the VLBI. The most recent VLBI data at 1.4 mm provide a size of $\approx 0.1 \text{ mas}$ (Krichbaum et al. 1998) which at 8 kpc corresponds to only $1.2 \cdot 10^{13} \text{ cm} =$

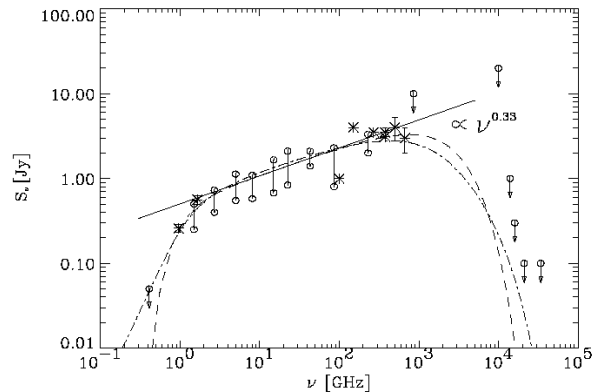


Figure 4. Radio spectrum of Sgr A*. Minimum and maximum fluxes show the variability level.

0.8 AU or, in terms of a $3 M_\odot$ BH Schwarzschild radius (see § 6), of only $\approx 14 R_S$. Moreover the source appears elongated with the intrinsic major axis ≈ 3 times greater than the minor axis and oriented in the North-South direction (Lo et al. 1998). This result, if confirmed, could indicate the presence of a weak radio-jet. Circular polarization is observed at several radio frequencies but until recently only upper limits ($< \text{few } \%$) were set for linear polarization. Aitken et al. (2000) have now discovered linear polarization at level of 10-20 % at sub-mm frequencies ($\geq 100 \text{ GHz}$). The sub-mm part of the Sgr A* spectrum seems peculiar also because it shows a bump of emission with respect to the extrapolation of the radio power-law. Indeed, using simultaneous observations at different frequencies from 10 cm to 1 mm, Falke et al. (1998) found at $> 100 \text{ GHz}$ an excess which implies a change in the spectral slope.

4. Evidences for a Massive Black Hole at the GC

High gas velocities in the vicinity of the putative MBH of the galaxy were also predicted by Lynden-Bell & Rees in 1971 as a consequence of the gravitational pull exerted by the BH. These authors suggested to search for radio recombination lines of the thermal gas close to the BH to measure gas velocities and then to estimate the BH mass. High velocities of the Sgr A West ionized gas have been indeed observed, since 1974, using the H recombination lines (H109 α , H91 α , H92 α) the forbidden line $\lambda 12.8 \mu\text{m}$ of [NeII] and the $\lambda 2.17 \mu\text{m}$ Br γ line (Mezger et al. 1996; Yusef-Zadeh et al. 2000). These measures could show that the dynamics at radii $R > 1.5\text{-}2 \text{ pc}$ (i.e. outside the CND inner ring) is dominated by the nearly-isothermal central star cluster, while within 1.5 pc from the center the dynamics is due to a central mass of $\approx 3 \cdot 10^6 M_\odot$ enclosed within $\approx 0.17 \text{ pc}$. However gas motion measures cannot constrain further the volume of the central mass and also non-gravitational forces (magnetic fields, turbulence, etc.) may play a role making the

interpretation of the recorded velocities not obvious. Star kinematic studies, based on both stellar dispersion and rotation velocities, started in 1978, with the aim of evaluating the central mass $M(R)$ enclosed within the radius R down to distances < 0.1 pc. The most convincing results have been obtained in the last 8 years thanks to high resolution NIR observations performed with speckle/adaptive optics in the K band ($2.2\mu\text{m}$), which allowed to provide independent determination of star velocities using measures of star proper motions. The recent paper by Genzel (2000) summarizes the results obtained both with the SHARP CCD camera mounted on the 3.5m ESO NTT telescope (Genzel et al. 1997) and with the NIRC camera at the 10 m Keck telescope (Ghez et al. 1998). About 1000 stars with $m(K) < 16$ ($= 0.25$ mJy) were imaged between 1992-1999 within the central 1 pc ($25''$) with angular resolutions in the range 0.15 - $0.05''$. Proper motions for 100 stars could be determined along with 200 high quality spectra. The important improvement provided by proper motion measures is that they allow measurements of stellar velocities of the very faint stars which are very close ($R < 0.6''$) to Sgr A* and which show motions at > 1000 km s $^{-1}$ (1470 km s $^{-1}$ for the closest star in projection, at $0.1'' = 800$ AU from the radio source). The simultaneous measure of proper motion and radial velocity for 32 stars between $1''$ - $5''$ from Sgr A* also allowed to test the fundamental hypothesis of velocity isotropy assumed by most of the mass estimators. Combining radial and proper motions data and using various projected mass estimators Genzel et al. (2000) derived the mass distribution reported in Fig. 5. The enclosed mass for $R > 1$ - 2 pc can be accounted for by the isothermal star cluster (broken line in Fig. 5) but at lower radii, in particular to fit data at 0.015 pc (≈ 3000 AU), it is necessary either to assume a point mass of $2.9 \cdot 10^6 M_{\odot}$ (full line) or to invoke the presence of a dark cluster of objects with central density of $4 \cdot 10^{12} M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ (dotted line). Even composed of stellar BHs, such a cluster would not be stable for more than 10^7 yr and the hypothesis of a massive black hole at the Galactic Nucleus is now extremely strong. The very recent discovery with the Keck of curvature in the trajectories of 3 of the closest stars to Sgr A* (Ghez et al. 2000), confirms that stars are orbiting around the GC, increases by a factor 10 the density required for an alternative dark cluster and proves that the radio source is at less than $0.05''$ from the dynamical center of the stars. NIR observations have also led to the discovery of a cluster of about 25 bright, young, hot stars most of them belonging to the complex IRS 16 centered $\approx 2''$ east of the GC. These very luminous stars show broadened and P-Cyg type HeI/II emission lines which indicate that their helium rich surfaces are expanding as powerful stellar winds with velocities of $V_w \approx 500$ - 1000 km s $^{-1}$ and mass loss rates $\dot{M}_w \approx 1$ - $80 \cdot 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ (Najarro et al. 1997). These outflows produce a hypersonic wind of density $n_w \approx 10^3$ - 10^4 cm^{-3} which pervades the central pc. These stars also emit $\approx 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ in UV and can therefore totally account for the entire UV luminosity required to excite Sgr A West and to heat

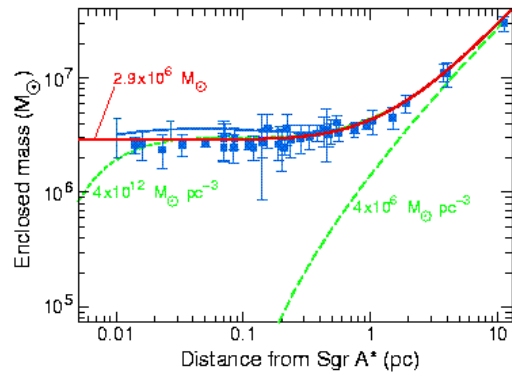


Figure 5. Enclosed mass vs. distance from GC.

the dust of the central cavity and of the CND (§ 2). To conclude with IR observations we have to mention the important upper limits set by Menten et al. (1997) on the NIR flux from Sgr A* which imply an $L_{\text{NIR}} < 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ for the compact radio source.

5. High Energy Observations of Sgr A*

After the first detections of high energy emission from the general direction of the GC made with non-imaging instruments in the decade 1970-1980, the first real X-ray images with arcmin resolution were obtained with the Einstein Observatory (Watson et al. 1981). In addition to diffuse emission, 12 point sources were detected within the central $20'$, one of which, 1E 1742.5-2859, observed at $< 1'$ from Sgr A* with $L_{1-4 \text{ keV}} = 1.5 \cdot 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$. Between 1980-1990 several observations were carried out in the standard and hard X-ray bands and a number of transient sources were detected. The most remarkable observations were certainly those performed with the coded mask XRT instrument on SpaceLab2, which provided the first ever images ($3'$ resolution) of the GC in hard X-rays (3-30 keV) (Skinner et al. 1987). Sgr A* appeared again rather faint ($L_{3-30 \text{ keV}} = 5 \cdot 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$), in spite of the high expectations for an hard spectrum of the type of Cyg X-1. However in 1991 the Rosat telescope with $25''$ resolution in the band 0.1-2.5 keV, could separate 1E 1742.5-285 in 3 sources one of which, RXJ 1745.6-2900, was found within $10''$ from Sgr A* (Predehl & Truemper 1994). Rosat luminosity ($L_{0.8-2.5 \text{ keV}} = 3 \cdot 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$) however falls below 2 orders of magnitude from extrapolation of the N_H -corrected XRT luminosity. The possibility of strong variability or additional N_H were considered but ASCA 1993-1994 observations in the range 0.1-10 keV, revealed presence of 2 point sources, a soft and stable one close to the Nucleus and another harder and transient about $1'$ away (Koyama et al. 1996). The authors concluded then that the flux observed by the hard X-ray instrument on SL2 (also confirmed by ART-P/GRANAT, Pavlinsky et al. 1994) was due to the transient source and not to Sgr A*.

ASCA also confirmed and improved the results of EXOSAT, Tenma and Ginga on the presence of hard X-ray diffuse emission. A large part of the Nuclear Bulge seems permeated by hot plasma emitting X-ray diffuse emission with thermal spectrum of $T \approx 10$ keV and numerous K emission lines of He-like and H-like ions. The diffuse source has an elliptical shape $1^\circ \times 1.8^\circ$ elongated on the galactic plane. The emission peaks around the center where a hot spot with an oval $2' \times 3'$ shape ($= 4.8$ pc \times 7.2pc) and luminosity of $\approx 10^{36}$ erg s $^{-1}$ was also imaged with ASCA. This emission is puzzling because at this temperatures the gas would not be bound by the GC gravitational potential. The estimated expansion of the large shell at sound speed provides an age of ≈ 50000 yr and input energy of $\approx 10^{54}$ erg for the gas, and continuous heating is required with power of $\approx 10^{41-42}$ erg s $^{-1}$. Tanaka et al. (2000) have recently argued against thermal origin of this emission and proposed that charge-exchange interaction of low-energy cosmic-rays with ISM contribute to it. ASCA also detected 6.4 keV neutral iron line diffuse emission in the Nuclear Bulge, and more precisely from Sgr B2 the most massive of the GMC. This fluorescence line can be produced by high energy emission which is scattered in the neutral environment of a GMC. Murakami et al. (2000) estimated, comparing data to simulations, that an external source at a distance d , should have emitted about $L_{2-10 \text{ keV}} = 3 \cdot 10^{39} (d/100 \text{ pc})^2$ erg s $^{-1}$ over 100 yr. This excludes binary transient sources but leaves open the possibility for a flare of Sgr A*. If emitted from Sgr A*, radiation should have been travelling through ≈ 300 l.y. to reach SGR B2. These data could then probe 300 yr ago flaring activity from Sgr A*. Similar conclusions were reached by Sunyaev & Churazov (1998) who investigated also dependence of the line characteristics and variability with position and time behavior of primary source, while Fromerth et al. (2001) found that data are also compatible with location of primary source inside the GCM.

To a be a faint source in X-rays does not prevent to be strong emitters in gamma rays, in particular for such extreme objects like BH, which are known to emit very hard radiation and suspected to generate e^+e^- annihilation line. The GC has been a priority target of the first satellite imager of soft γ -rays (30 keV - 1300 keV) SIGMA. SIGMA with its 13'-15' resolution and large field of view performed deep surveys of the galactic bulge between 1990-1997 cumulating nearly 10^7 s of data. SIGMA found that in this band the 1° region around the GC is dominated by the otherwise anodyne X-ray source 1E 1740.7-2942, which follow up observations revealed to be associated to radio-jets and which is now one of the 4 persistent galactic BH candidates X-ray sources. Sgr A* appeared instead silent. The only weak flare observed by SIGMA from the vicinity of the GC in 1991 (see Fig. 6), was attributed to a point source $> 9'$ away from Sgr A* (Goldwurm et al. 1994; Vargas et al. 1996). A recent re-analysis of the whole SIGMA data by Goldoni et al. (1999) have provided the best

low-energy γ -ray upper limits for this source (see also Fig. 7 and Goldwurm et al. 2000). The results imply $L_{30-300 \text{ keV}} < 1.2 \cdot 10^{36}$ erg s $^{-1}$, and an upper limit (3σ) of $3.3 \cdot 10^{-4}$ ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$ for narrow 511 keV line point source at the GC was also obtained with SIGMA (Malet et al. 1995). OSSE/GRO mapped the galactic diffuse 511 keV emission and could identify a bulge component of about the same value in flux than the above quoted SIGMA upper limit, with a positronium fraction of 0.89 (Purcell et al. 1997). Due to the limited angular resolution ($> 4^\circ$), however it was not possible to estimate if any of this emission is from a central point source.

A source (2EG J1746-2852) in the Galactic Center was also detected by EGRET/GRO (Mayer-Hasselwander et al. 1998) at > 30 MeV. The poor angular resolution of the instrument ($\sim 1^\circ$) does not exclude it is actually diffuse. The spectrum is a broken power-law with photon indexes of 1.3 and 3.1 below and above 1900 MeV, which seems against pure π_0 decay origin, with total luminosity of $L_{>100 \text{ MeV}} = 2.2 \cdot 10^{37}$ erg s $^{-1}$. SAX (NFC/MEC) monitoring of GC has not provided new results on the Nucleus itself, however it was found that the soft component ($T \approx 0.6$ keV) of the local diffuse emission seems related to Sgr A East and it is well interpreted as thermal emission from a SNR (Sidoli et al. 1999). The hard component ($T \approx 8$ keV) instead lies along the plane as shown previously by ART-P and ASCA.

Chandra observations with the unprecedented angular resolution of $0.5''$, carried out in fall 1999, have instead resolved the Rosat source in few components, one of which could be point-like and lies within $0.35''$ from Sgr A* (Baganoff et al. 2001). The source, which may well be the real X-ray counterpart of the radio source, has a power-law spectrum rather steep (≈ 2.7) and luminosity $L_{2-10 \text{ keV}} \approx 2 \cdot 10^{33}$ erg s $^{-1}$. Although the 0.5-2 keV flux is very uncertain due to the low accuracy of N_H estimation it seems clear that Sgr A* soft X-ray luminosity is well below the Rosat value.

6. The Problem of Sgr A* Low-Luminosity

In spite of the very compelling evidences for a MBH at the Galactic Nucleus, Sgr A* does not behave like a simple mass scaled-down AGN. Summing measured luminosities and considering the quoted upper limits, Sgr A* bolometric luminosity is

$$L_{Sgr A^*} < 5 \cdot 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$$

The UV luminosity is uncertain due to the high extinction but the fact that Sgr A West ionization can be provided by the IRS 16 cluster of hot stars implies that there is not an additional strong source of UV, whose emission would also be re-emitted by the heated dust and observed in IR. The EGRET source can rise this value by a factor 5 but in any case the Nucleus remains sub-luminous. For a BH at the GC with mass $M = 3.0 \cdot 10^6 M_\odot$, the

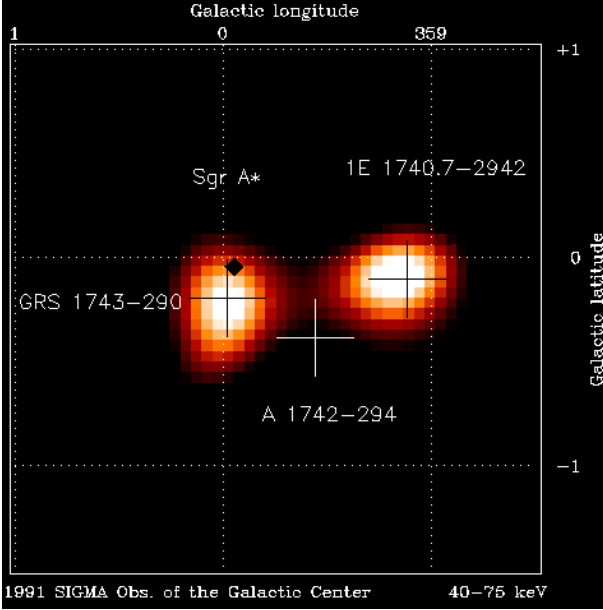


Figure 6. Image around Galactic Nucleus obtained by SIGMA in 1991. Black diamond is position of Sgr A*, and crosses of SIGMA sources of the region.

Schwarzschild radius R_S and Eddington luminosity L_E are

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} = 9.0 \cdot 10^{11} \text{ cm} = 0.060 \text{ AU} \sim 7.5 \mu\text{s}$$

$$L_E = \frac{4 GM m_p}{\sigma_T} = 3.9 \cdot 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$$

In spherical accretion, matter with density n_w flowing with relative velocity V_w within a distance R_A (accretion radius) from the BH is captured, undergoes a shock which dissipates the kinetic energy in thermal energy and then is accreted radially with free-fall velocity and mass accretion rate \dot{M}_A providing a power L_A (accretion luminosity) given by

$$R_A = \frac{2GM}{V_w^2} = 1.6 \cdot 10^{17} \text{ cm} = 0.05 \text{ pc} \sim 1.3''$$

$$\dot{M}_A = R_A^2 \rho_w V_w = 5.5 \cdot 10^{22} \text{ g s}^{-1} = 8.7 \cdot 10^{-4} M_\odot \text{ yr}^{-1}$$

$$L_A = \frac{GM \dot{M}_A}{R_S} = 2.4 \cdot 10^{43} \text{ erg s}^{-1} = 0.061 L_E$$

where wind parameters quoted in § 4 were used, i.e. $V_w = 700 \text{ km s}^{-1}$, $n_w = 5.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$. 3D simulations of the stellar winds from the IRS 16 cluster flowing into the GC black hole have been performed by Cocker and Melia (1997) using results of Najarro et al. (1997) and they obtained a mass accretion ≈ 1 -2 times the value of \dot{M}_A . So the accretion luminosity is 10^6 - 10^7 times higher than the measured bolometric luminosity and efficiency of conversion of available energy in radiation must be lower than 10^{-6} . The final efficiency depends actually on how the matter, once captured at R_A is accreted, how reaches the BH event horizon, which are the characteristics of the flow and whether a disk forms. Cocker

and Melia (1997) in their simulations also found that the accreted specific angular momentum l in units of cR_S ($\lambda = l/cR_S$) varies around an average of $\lambda = 40 \pm 10$ with the sign swapping on time-scales of ~ 100 years. This implies that the circularization radius $R_c \approx 2\lambda^2 R_S$ (distance at which angular momentum equals the Keplerian value) is $< 3000 R_S$ and a large accretion disk probably does not form.

7. Accretion Models for the GC Black Hole

An optically thick and geometrically thin accretion disk has efficiency of the order of 0.1 and, if present around Sgr A*, would originate a bright spectral peak in the UV band similar to the blue bump of AGNs, followed by a steep Wien tail which may contribute little to X-rays. The low energy tail would extend to NIR and such component would violate the Menten et al. (1997) upper limits.

The first attempt to fit the entire spectrum of Sgr A* modeling the accretion into the massive BH was done by Melia (1992, 1994), who computed emission produced in pure spherical Bondi-Hoyle geometry. Without the viscous dissipation which occurs in disks, matter would fall into the hole heated up by simple adiabatic compression, and efficiency of conversion of gravitational energy in radiation would be very small. However it is usually assumed that matter carries, in the fall, the magnetic field, maintained in equipartition with the gas, and magnetic dissipation by turbulence or field lines reconnection can heat efficiently the particles which then emit synchrotron, free-free and inverse Compton radiation. With this model Melia (1992) could fit the available data for a black hole mass of $10^6 M_\odot$, a value smaller than recent estimates. In its 1994 model, Melia also included an optically thick disk at small radii, to account for the effects of the accreted angular momentum, but the Menten et al. (1997) IR upper limits are not compatible even with such small disk. Recently, Cocker and Melia (2000) revisited the model improving computation of the emitted spectrum and assuming magnetic field B in sub-equipartition by letting its value to be free parameter. Considering variability the model luminosities seem marginally compatible with the data and imply that B , which is of few mG at R_A ($\sim 10^5 R_S$), does not reach the equipartition value at intermediate radii. Only in the inner region of ≈ 5 -25 R_S , where gas circularizes and a small Keplerian disk is formed, the magnetic dynamo can rise the field to values of the order of 200 G. The emission from this inner region could then account for the sub-mm excess and for its polarization. However this variant of the model fits the data only for an effective accretion rate $< 10^{-4} \dot{M}_A$. In 1995, Narayan et al. proposed that accretion flows for sub-Eddington rates ($\dot{M} < \dot{M}_E$) in systems with BHs be dominated by advection. These models (ADAF) assume a very weak coupling between protons and electrons in the flow and the energy carried by protons is not transmitted efficiently to the radiating electrons but rather advected into the hole.

The plasma gets very hot (optically thin), flows with 2 temperatures ($kT_p \approx 10^9$ K, $kT_e \approx 10^7$ K), with nearly spherical geometry (geometrically thick disks), but with viscous dissipation and momentum transport. The radio spectrum is generated by optically thick self-absorbed synchrotron emission from hot nearly-relativistic thermal electrons at different temperatures. Each disk ring at radius R gives rise to a spectrum peaked at the critical frequency above which radiation becomes optically thin. A total flat spectrum is then produced by the superposition of these ring spectra. Highest radio frequencies are generated by the hottest electrons of the inner regions close to the BH while inverse Compton produces a weak tail in IR, optical and UV, and X-rays are produced by thin thermal bremsstrahlung from electrons at all radii till R_A . The best ADAF model for Sgr A* (Narayan et al. 1998) fits the radio data, the Rosat X-ray flux and the IR and hard X-rays upper limits (see Fig. 7) for the correct BH mass but for an accretion rate $\dot{M} \approx 10^{-5} M_\odot \text{ yr}^{-1}$. This is more than a factor 10 lower than estimated from the IRS 16 stellar winds. Since in ADAF $L \propto \dot{M}^2$ the luminosity for 10 times the rate would be 100 times greater and the discrepancy is not easily explained (Quataert et al. 1999). To account for the EGRET γ -ray source Narayan et al. (1998) computed the contribution of decay of pions produced by proton-proton collisions in the very hot inner region of the ADAF. The spectrum could reproduce the EGRET spectral shape but not the flux normalization. On the other hands electrons produced by the muons seem able to naturally account for the *cm* part of the spectrum not well explained by the thermal electrons (Mahadevan 1998).

The spectrum of Narayan et al. 1998 fitted the Rosat flux and the new value of X-ray luminosity obtained with Chandra certainly makes more acute the problem of accretion rate (see Fig. 7). Blandford & Begelman (1999) argued that ADAFs must have outflows in form of winds and, more recently, it was also found that convection in the disk may reduce outward transport of angular momentum reducing the net flow of matter into the hole (Quataert & Gruzinov 2000). Both these new variants of ADAF (known as ADIOS and CDAF) could reduce effective mass accretion. However Quataert & Narayan (1999) discussed the spectral shape of ADAF with winds and found that since soft X-rays are produced far from the hole (between 10^4 - $10^5 R_S$), outflows, expected in the inner regions, will not reduce the expected X-ray emission and discrepancy with the accretion rates is not resolved. Moreover the Chandra steep spectrum does not seem compatible with thermal bremsstrahlung. Another important difficulty for ADAF models is the recent discovery of linear polarization in the sub-mm band. In both ADAF and Bondi-Hoyle models this excess is produced in the inner regions of the flow and therefore even if radiation can be initially polarized, the accreting plasma encountered on the way out would depolarize the emission by Faraday effect (Agol 2000), unless very peculiar geometries are invoked. Observed values of polarization seem to imply accretion rates

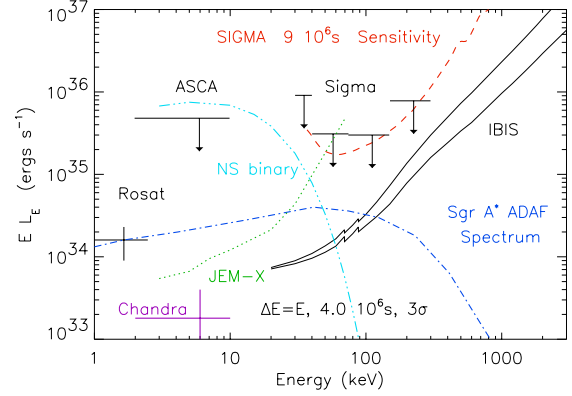


Figure 7. IBIS (full lines) and JEM-X (dotted) INTEGRAL sensitivities and the ADAF spectrum (broken-dotted) of Sgr A* with SIGMA and ASCA upper limits, and Rosat and Chandra luminosities.

as low as $10^{-8} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ making of course need for low-efficiency models much less important.

All these factors certainly revive the non-thermal models of Sgr A*. The flat (index ≈ 0.3) radio spectrum could indeed be interpreted as due to thin synchrotron radiation from a quasi mono-energetic distribution of electrons, e.g. accelerated by shocks inside the accretion flow. The low frequency cut-off is due to self absorption while the high frequency one to the cut off in the truncated power-law electron distribution. Such model was investigated by Beckert et al. (1996) and refined by Beckert & Duschl (1997). X-rays can then be produced by self synchrotron Compton (SSC) emission. The main difficulty was to correctly account for the X-ray flux and to explain the “ad-hoc” cut off in the electron distribution. Another non-thermal model for Sgr A* is the jet/nozzle model, recently re-discussed by Falcke & Markoff (2000) (see references therein). The authors propose that radio emission is generated in a compact radio jet, similar to those seen in AGNs, but less powerful. This model could explain the possible asymmetry in the radio and sub-mm shape of the source (Lo et al. 1998) which, if confirmed, would indeed favor the presence of a jet. The base of the jet where the acceleration of the magnetized plasma takes place, the nozzle, is a compact region where the sub-mm radiation is originated. The nozzle is close to the BH and to the inner part of the accretion flow. The jet mechanism is not known but the authors invoke a coupling between jet and accretion disk. As for the mono-energetic electron model the X-rays are produced by SSC and the expected spectrum seems to fit well the recent Chandra results. However the accretion flow must not provide relevant X-ray emission and the problems of low-efficiency accretion or of a much lower effective accretion rate than the one estimated from data on stellar winds remain.

Finally, the Sgr B2 6.4 keV line could indicate that Sgr A* is flaring, may be cyclically like the X-ray Novae. However if the accreted material is stored between the flares, in a large low-viscosity disk, the latter should be visible in IR.

8. Perspectives and Conclusions

ADAFs have become popular in recent years because they seemed able to explain, in the frame of BH accretion disk thermal models, the low efficiencies observed in the nucleus of our Galaxy and of other close normal galaxies. However these models are now encountering serious difficulties, and non-thermal models become again competitive. All models however fail to explain why the closest known massive black hole to us radiates so little, unless we admit that it does not accrete the available matter as expected. Major advances in understanding of the physics of the Galactic Center will be provided in the next years by new and more accurate observations, in particular at high energies. The Chandra and XMM-Newton observatories will probably address the question of the X-ray (0.1-15 keV) luminosity, variability and spectrum of Sgr A* and of the characteristics and origin of the local X-ray diffuse emission. The next ESA γ -ray (3 keV - 10 MeV) mission INTEGRAL will allow to study, if present, the ADAF hard X-ray component predicted by Narayan et al. (1998). Fig. 7 reports the expected sensitivity of the medium energy (20 keV - 10 MeV) instrument (IBIS) on-board INTEGRAL compared with the ADAF model. Detailed simulations (Goldwurm et al. 2000) show that IBIS will be able to detect the expected thermal bremsstrahlung hard component of Sgr A* in $4 \cdot 10^6$ s. With INTEGRAL it will be possible to search for a compact source of 511 keV line at the GC. In spite most models do not predict a strong e^-e^+ annihilation line contribution from the MBH itself, Fatuzzo et al. (2000) argued that part of the 511 keV bulge component may be due to cumulative effect of pair production in the expanding shells of repeated Sgr A East type events. High energy observations with GLAST at > 100 MeV will resolve the standing problem of the EGRET source, possibly linked to the Sgr A* or to the non-thermal Sgr A East shell. The latter is also expected to provide detectable flux in the TeV range, making the GC an interesting target also for next generation of ground VHE/UHE γ -ray and neutrino experiments. Moreover the Galactic Center has been recognized as possible site of large cold dark matter concentration and annihilation (Gondolo & Silk 1999). Sgr A* is probably the closest massive black hole, and in spite presently in low state of activity, remains a highly privileged target for astronomical multi- λ observations and for future astroparticle experiments.

Acknowledgments

I thank Fulvio Melia for very useful discussions and Frederick K. Baganoff for providing information about Chandra observations before publication.

References

- Aitken D.K., et al., 2000, *ApJ*, 534, L173.
 Agol E., 2000, *ApJ*, 538, L121.
 Balick B. & Brown R.L., 1974, *ApJ*, 194, 265.
 Baganoff F., et al., 2001, *ApJ*, *subm.*, aph/0102151.
 Beckert T., et al., 1996, *A&A*, 307, 450.
 Beckert T. & Duschl W.J., 1997, *A&A*, 328, 95.
 Blandford R., Begelman M., 1999, *MNRAS*, 303, L1.
 Coil A.L. & Ho P.T., 2000, *ApJ*, 533, 245.
 Coker R.F. & Melia F., 1997, *ApJ*, 488, L149.
 Coker R.F. & Melia F., 1999, *ApJ*, 534, 723.
 Fatuzzo M., et al., 2000, *ApJ*, *subm.*, aph/0007371.
 Falcke H., et al., 1998, *ApJ*, 499, 731.
 Falcke H. & Markoff S., 2000, *A&A*, 362, 113.
 Fromerth M.J., et al., 2001, *ApJL*, 547, L129.
 Genzel R., et al., 1997, *MNRAS* 291, 219.
 Genzel R., 2000, *Star2000 Conf.*, aph/0008119.
 Ghez A.M., et al., 1998, *ApJ*, 509, 678.
 Ghez A.M., et al., 2000, *Nature* 407, 349.
 Goldoni P., et al., 1999, *Astr. Lett. & C.*, 38, 305.
 Goldwurm A., et al., 1994, *Nature* 371, 589.
 Goldwurm A., et al., 2000, *Proc. 19th Texas Symp.*, ed. Paul J. et al., M-Symp. 15, atroph/9904104.
 Gondolo P. & Silk J., 1999, *Phys. Rev. L.* 83, 1719.
 Koyama K., et al., 1996, *PASJ* 48, 249.
 Krichbaum T.P., et al., 1998, *A&A*, 335, L106.
 La Rosa T.N., et al., 2000, *AJ*, 119, 207.
 Lo K.Y., et al., 1998, *ApJ*, 508, L61.
 Lynden-Bell D., Rees M.J., 1971, *MNRAS*, 152, 461.
 Mahadevan R., 1998, *Nature*, 394, 651.
 Malet I., et al., 1995, *ApJ*, 444, 222.
 Mayer-Hasselwander, et al., 1998, *A&A*, 335, 161.
 Mezger P.G., et al., 1996, *A&A Rev.*, 7, 289.
 Melia F., 1992, *ApJ*, 387, L25.
 Melia F., 1994, *ApJ*, 426, 577.
 Menten et al., 1997, *ApJ*, 475, L111.
 Morris M. & Serabyn E., 1996, *ARA&A*, 34, 645.
 Murakami H., et al., 2000, *ApJ*, 534, 283.
 Najarro F., et al., 1997, *A&A*, 325, 700.
 Narayan R., et al., 1995, *Nature*, 374, 623.
 Narayan R., et al., 1998, *ApJ*, 492, 554.
 Pavlinsky M.N., et al., 1994, *ApJ*, 425, 110.
 Predehl P., & Truemper J., 1994, *A&A*, 290, L29.
 Purcell W.R., et al., 1997, *ApJ*, 491, 725.
 Quataert E. & Narayan R., 1999, *ApJ*, 520, 298.
 Quataert E., et al., 1999, *ApJ*, 517, L101.
 Quataert E. & Gruzinov A., 2000, *ApJ*, 539, 809.
 Skinner G.K., et al., 1987, *Nature*, 330, 544.
 Sidoli L., et al., 1999, *A&A*, 349, L49.
 Sunyaev R. & Churazov E. 1998, *MNRAS* 297, 1279.
 Tanaka Y., et al., 2000, *PASJ*, 50, L52.
 Vargas M., et al., 1996, *ASP Conf. Ser.*, 102, 431.
 Watson M.G., et al., 1981, *ApJ*, 250, 142.
 Yusef-Zadeh F., et al., 2000, *Science*, 287(5450), 85.

A NEW X-RAY FLARE FROM THE GALACTIC NUCLEUS DETECTED WITH THE *XMM-NEWTON* PHOTON IMAGING CAMERAS

A. GOLDWURM, E. BRION,¹ P. GOLDONI, P. FERRANDO, F. DAIGNE, AND A. DECOURCHELLE
 Service d'Astrophysique, DAPNIA/DSM/CEA, CE-Saclay, F-91191 Gif-Sur-Yvette, France

R. S. WARWICK
 Department of Physics and Astronomy, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK

AND

P. PREDEHL
 Max-Planck Institut für Extraterrestrische Physik, Postfach 1312, 85741 Garching, Germany
Received 2002 July 24; accepted 2002 October 24

ABSTRACT

Sgr A*, the compact radio source believed to be the counterpart of the massive black hole at the Galactic nucleus, was observed to undergo rapid and intense flaring activity in X-rays with *Chandra* in 2000 October. We report here the detection with *XMM-Newton* European Photon Imaging Cameras of the early phase of a similar X-ray flare from this source, which occurred on 2001 September 4. The source 2–10 keV luminosity increased by a factor of ≈ 20 to reach a level of 4×10^{34} ergs s⁻¹ in a time interval of about 900 s, just before the end of the observation. The data indicate that the source spectrum was hard during the flare. This *XMM-Newton* observation confirms the results obtained by *Chandra* and suggests that in Sgr A* rapid and intense X-ray flaring is not a rare event. This can constrain the emission mechanism models proposed for this source and also implies that the crucial multiwavelength observation programs planned to explore the behavior of the radio/submillimeter and hard X-ray/gamma-ray emissions during the X-ray flares have a good chance of success.

Subject headings: accretion, accretion disks — black hole physics — Galaxy: center — X-rays: general

1. INTRODUCTION

The bright, compact, and variable radio source Sgr A* is believed to be the radiative counterpart of the $2.6 \times 10^6 M_\odot$ black hole that governs the dynamics of the central parsec of our Galaxy (Melia & Falcke 2001). The compelling evidence for the presence of a dark mass concentration at the Galactic center (Genzel et al. 1997; Ghez et al. 2000), which implies the presence of a massive black hole, contrasts remarkably with the weak high-energy activity of such an extreme object. In spite of the fact that some amount of material, provided either by stellar winds from a close stellar cluster or by the hot surrounding medium, is probably feeding a moderate/low level of accretion, the total bolometric luminosity of the source amounts to less than 10^{-6} of the estimated accretion power (Melia & Falcke 2001; Goldwurm 2001).

This has motivated the development of several black hole accretion flow models with low radiative efficiency, some of which have also been applied to binary systems, low-luminosity nuclei of external galaxies and low-luminosity active galactic nuclei. These models include spherical Bondi accretion in conditions of magnetic field subequipartition with a very small Keplerian disk located within the inner 50 Schwarzschild radii (R_S), large hot two-temperature advection-dominated accretion flow (ADAF) disks or nonthermal emission from the base of a jet of relativistic electrons and pairs, and some other variants or combination of the above (see the review by Melia & Falcke 2001). However,

any such model still predicts some level of X-ray emission from Sgr A*, and determining the properties of such emission would constrain the theories of accretion and outflows in the massive black holes and in general in compact objects.

The search for high-energy emission from Sgr A* with focusing X-ray telescopes dates back to the end of the 1970s (Predehl & Trümper 1994; Baganoff et al. 2001a; Goldwurm 2001) but has recently come to a turning point with the remarkable observations made with the *Chandra X-Ray Observatory* in 1999 and in 2000. Baganoff et al. (2001a) first reported the detailed 0.5 resolution images obtained with *Chandra* in the range 0.5–7 keV, which allowed, finally, the detection of weak X-ray emission from the radio source. The derived luminosity in the 2–10 keV band was 2×10^{33} ergs s⁻¹ for a distance of 8 kpc, and the measured spectrum was steep, with a power-law photon index of 2.7. Marginal evidence that the source is extended on a 1'' scale was also reported, but at low significance level. Then in 2000 October, the same source was seen to flare up by a factor of ≈ 45 in a few hours (Baganoff et al. 2001b). The luminosity increased from a quiescent level similar to the one measured in 1999 to a value of 10^{35} ergs s⁻¹. The flare lasted a total of 10 ks, but the shortest variation took place in about 600 s, implying activity on length scales of $\approx 20 R_S$ for the above quoted mass of the Galactic center black hole. Evidence of spectral hardening during the flare was also reported by the authors, who determined a source power-law photon index during the event of $1.3(\pm 0.55)$, significantly flatter than that observed during the quiescent state. These results constrain models of the accretion flow and radiation mechanism for Sgr A*. A confirmation of the *Chandra* results, and in particular a better determination of the flaring properties of the

¹ Also: Astronomical Observatory and University “Louis Pasteur,” Strasbourg, France.

source, are therefore crucial for the modeling of the physics of the Galactic center and in general for the theories of accretion in black hole systems.

XMM-Newton, the other large X-ray observatory presently in operation, features three large area X-ray telescopes coupled to three CCD European Photon Imaging Cameras (EPIC) operating in the 0.1–15 keV range and to two reflection grating spectrometers (RGSs) working in the 0.1–2.5 keV band (Jansen et al. 2001). Although its angular resolution (6" FWHM) is insufficient for properly resolving Sgr A* in quiescence, the high sensitivity and wide spectral range of *XMM-Newton* allow deep studies of the X-ray emission of such a complex and crowded region as the Galactic center. Indeed, an intense flare such as the one seen by *Chandra* can be easily detected with *XMM-Newton* thanks to its large effective area, and its timing and spectral properties can be studied.

The Galactic center region is one of the priority targets of the *XMM-Newton* mission and was included in the guaranteed time program. Visibility constraints and solar flare events have, however, delayed the monitoring of the very center of our Galaxy. A complete pointed observation was finally performed in 2001 fall, and in this paper we report the detection with *XMM-Newton* of another X-ray flare from Sgr A* that occurred at this time.

2. OBSERVATIONS AND RESULTS

XMM-Newton was pointed toward the Galactic nucleus for about 26 ks on 2001 September 4. This observation was part of a large survey program of about 10 overlapping *XMM-Newton* pointings planned to map the Galactic plane within 1° from the Galactic center. Preliminary mosaicked images of the region have been presented by Warwick (2003), who showed that the region is complex and dominated by diffuse emission and some pointlike and extended bright sources. We report here results obtained with the EPIC cameras of *XMM-Newton* during the observation of the survey, which was directly pointed toward Sgr A* (observation GC6). The purpose of our analysis was to search for X-ray variability from this source of the type observed during 2000 fall with the *Chandra* telescope.

The observation with the EPIC Metal Oxide Semiconductor (MOS) cameras (Turner et al. 2001) started at 01:27:08 (UT) and lasted 26,127 s, while the PN camera (Strüder et al. 2001) was activated 4109 s after the MOS for a total exposure of 21,748 s. The EPIC cameras were used in standard full-frame imaging mode with the medium filter, while the RGS was used in spectral+Q mode and the optical monitor was blocked. Data reduction was performed using the *XMM-Newton* Science Analysis Software (SAS) package (version 5.3), using standard choices to select events for both MOS and PN cameras, namely, the 0–12 patterns for the MOS and both the single and double events for the PN. Inspection of the integrated count rate of the CCDs versus time revealed that the observation was slightly perturbed by weak soft proton flares. The CCD light curves show several peaks all along the observation and, in particular, at the beginning and at the end of it. The average combined count rate in the central CCD of the two MOS cameras was about 4.5 counts s⁻¹, while peaks due to the proton flares reached maximum values of 21 counts s⁻¹ for short time intervals. The counts arising from the flares are distributed fairly uniformly across the CCDs (i.e., with only a modest vignetting

effect) and, indeed, derived images did not show particular features due to these background events. The image recorded in the central CCD (11' × 11' for the MOS) is dominated by the diffuse emission of the Sgr A* east region, which is thermal in origin and rich in emission lines. Proper analysis of this component involves modeling of the variable background and composition of different images of the survey. The work is in progress, and results will be reported elsewhere. Here we concentrate rather on the analysis of the central point source, Sgr A*, and in particular on the search for variability of its X-ray emission.

In order to optimize the signal-to-noise ratio of the central source in the presence of the strong diffuse emission, and considering the typical width of the *XMM-Newton* point-spread function (15" half-power diameter), we extracted and analyzed light curves of events collected within a 10" radius region centered on Sgr A*. As shown in Figure 1, the 2–10 keV count rate from the combined MOS 1 and MOS 2 events selected in this way is quite stable around an average value of 0.08 counts s⁻¹ until the last 900 s of the observation. Then the count rate gradually increases to reach a value of about a factor of 3 higher in the last bin. The integrated count rate in the last 900 s reaches 7 σ over the average value measured before the flare, and the detected variation has a very low probability to be a statistical fluctuation.

A similar light curve, from a 9 times larger region of the central CCD, far from the source but including a bright part of the diffuse emission, is also reported for comparison in Figure 1 (scaled for clarity) and does not show any evidence of such an increase in the counting rate. The same trend is observed in the counts extracted from the PN camera (see Fig. 1, right). Since the PN stopped observing about 250 s before the MOS, the last part of the flare is not visible. However, the increase in the last (PN) 600 s is also highly significant (4.3 σ), and again, it is not detected in counts extracted from a region away from the source. Some proton flares occurred in the last part of the observation, and they increase the total CCD 2–10 keV count rate of about a factor of 1.4 in the last 1000 s. However, a detailed light curve of these events shows that they occur with a different time behavior than the source flare, and because of their uniform spatial distribution, they give rise to only a $\approx 1.5\%$ increase in the measured count rate within the 10" radius region during the last 900 s of the observation.

In order to confirm that the flare actually originated in Sgr A*, we constructed images using MOS events selected in different periods of the observation. In Figure 2 we report an image of the region around the nucleus integrated during the 1000 s before the flare and a similar image integrated during the last 1000 s and fully including the source flare. The basic image pixels were rebinned by a factor of 5, giving image pixels sizes of 5"5 width. The brightening we detected in the light curves is clearly due to the brightening of a central source with the counts in the central pixel of the image, which increase from 10 before the flare to 40 during the event. The general level of the image during the flare is a factor of 1.4 times higher than before the flare (for pixels greater than 20" from Sgr A*) due to the proton flaring events. This difference corresponds to the uniform increase in counts due to the presence of the proton flares in the last part of the observation.

We also used the SAS procedure (*eboxdetect*) for source detection to determine the location of the excess. On the

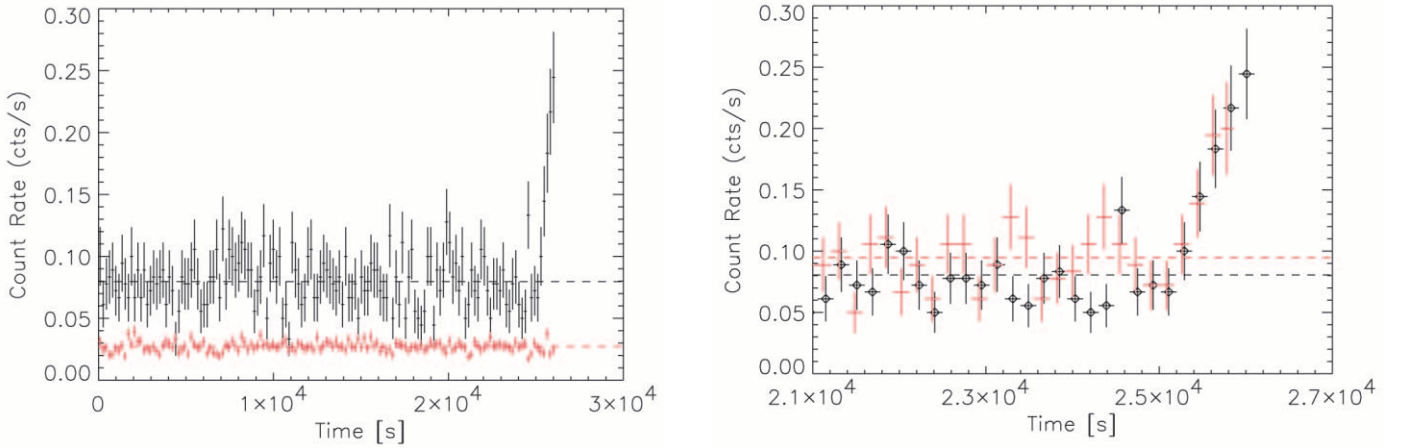


FIG. 1.—*Left*: Count rate, sampled in bins of 180 s, collected with both MOS cameras from a region within $10''$ from Sgr A* in the range 2–10 keV (*black top curve*). An equivalent light curve, collected from a $30''$ radius region centered about $1'$ east of Sgr A* and rescaled by a factor of 0.1 for clarity, is shown for comparison (*red bottom curve*). Dashed lines indicate the average value computed before the flare. *Right*: Zoom of the Sgr A* MOS light curve (*black circles*) around the period of the flare compared with a similar light curve (count rate within $10''$ from Sgr A* in the 2–10 keV band in bins of 180 s) from PN data (*red crosses*).

2–10 keV MOS 1 and MOS 2 image of the last 1000 s, rebinned to have pixel size of $4''$, we obtained the centroid of the source at R.A.(J2000.0) = $17^{\text{h}}45^{\text{m}}39^{\text{s}}.99$, decl.(J2000.0) = $-29^{\circ}00'26''.7$, with a pure statistical error of $0''.4$ (90% confidence level in one parameter) in each direction. To ensure that the attitude reconstruction does not suffer from large systematic errors, we checked the full low-energy (0.5–4 keV) MOS images for X-ray sources with stellar counterparts. In the full field of view of MOS 1, we identified six pointlike sources with stars of known position, determined the offsets between our derived positions and optical positions, and computed the average and rms values. We obtained an average offset of $-0''.03$ in R.A. and $0''.20$ in

decl., with rms of $0''.29$ (R.A.) and $1''.50$ (decl.). This implies that the absolute accuracy of location for the central CCD is not worse than the residual systematic uncertainties in the *XMM-Newton* focal plane, estimated to be $1''.5$ (Kirsch 2002). The derived flare position is therefore compatible with Sgr A* radio location (Yusef-Zadeh, Choate, & Cotton 1999), since it is offset from the latter by only $1''.5$ (of which $1''.4$ in decl.), i.e., within uncertainties.

The detailed study of *Chandra* data carried out by Baganoff et al. (2001a) showed that a number of other X-ray point sources are present in the vicinity of the Galactic nucleus, the nearest of which is associated with the infrared and radio object called IRS 13, at an angular distance of $4''$.

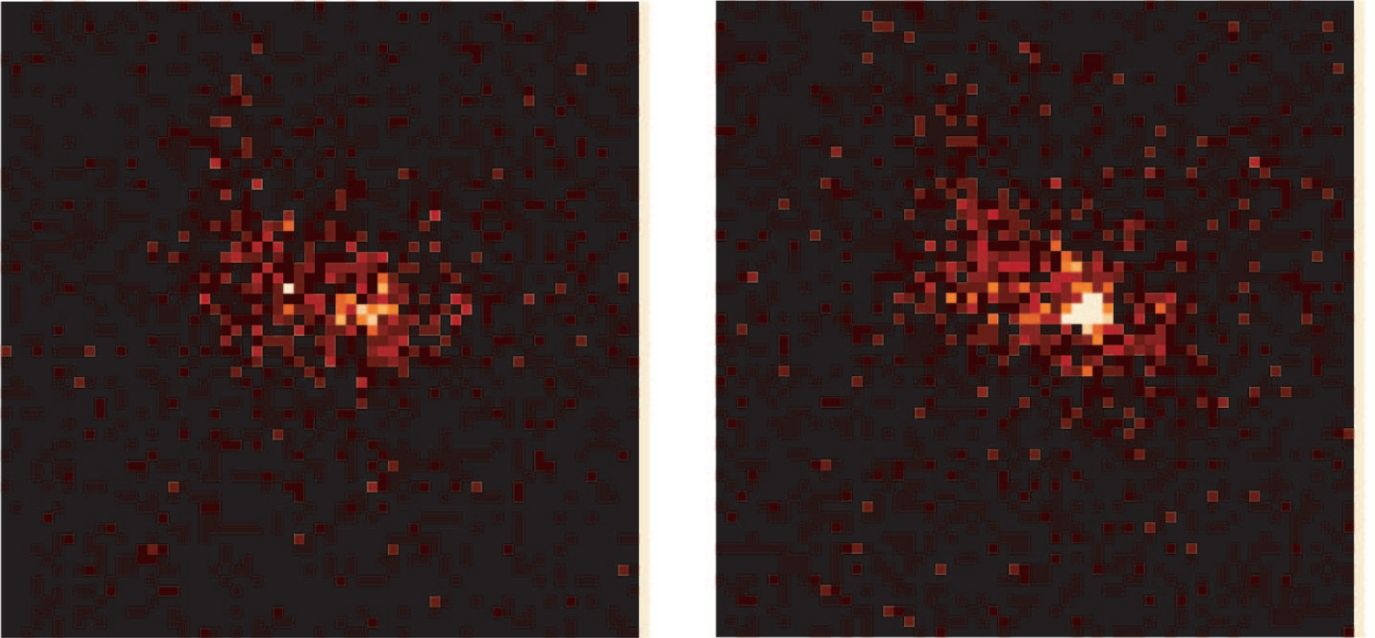


FIG. 2.—Images of the $5' \times 5'$ region around the Galactic nucleus in the 2–10 keV band obtained from MOS events integrated in the 1000 s before the flare (*left*) and in the last 1000 s of the observation including the flare (*right*). Pixels were rebinned to a size of $5''.5 \times 5''.5$. Sgr A* position is in the middle of the central bright pixel visible in the flare image (*right*).

The error box we derived with *XMM-Newton* excludes the possibility that the observed flare is due to IRS 13 (offset greater than $4''$) and also is not consistent with another region of excess counts in the *Chandra* images (offset $\approx 3''$), not fully recognized as a source but tentatively identified with IRS 16SW by Baganoff et al. (2001a). Of course, this does not completely rule out the possibility that another X-ray source in this crowded region of the sky may be the origin of the event. However, due to the close resemblance of the event with the *Chandra* flare, which was more precisely located on Sgr A*, and considering that generally X-ray binaries do not show such large variations on such short timescales, it seems unlikely that another X-ray source in the central star cluster is responsible for this flare. We conclude that the flare detected by *XMM-Newton* is associated with Sgr A*.

A first spectral analysis of the flaring event was performed by computing a simple hardness ratio (H/S), defined as the ratio between the measured counts (including background) in the hard band 4.5–10 keV and those in the soft band 2–4.5 keV. Using events collected by both MOS and PN cameras within $10''$ from Sgr A*, we computed the variation of the hardness ratio during the flare compared to the average value measured before the flare. The measure was performed separately for MOS (flare during last 900 s) and PN (last 650 s) events, and then we computed the weighted average. The hardness ratio increased by 0.32 ± 0.127 during the event with respect to the value before the flare. Although the count-rate hardening has a modest statistical significance of 2.5σ , it is fairly consistent with the trend observed with *Chandra* for the Sgr A* flare. Unlike Baganoff et al. (2001b), who observed the flare at low energy to follow of few hundred seconds the flare at high energy, we have not observed any significant lag between the light curve of the soft-energy band and the one of the high-energy band.

To derive a spectrum of the source during the flare state, we have to model the emission that is not due to Sgr A*. Detailed analysis of *Chandra* data showed that only $\approx 10\%$ of the 2–10 keV emission measured within $10''$ from the Galactic nucleus is due to Sgr A* in quiescence; the rest is mainly due to the local diffuse component (60%), to the contribution of the six other point sources seen by *Chandra* (20%), and to more diffuse Galactic emission together with the instrumental background (10%). To model the thermal component, Baganoff et al. (2001a) used the Raymond & Smith (1977) hot-gas spectral model with twice solar elemental abundance (Raymond & Smith 1977). The contribution from six point sources in this region was modeled with a power law of photon index ≈ 2.5 , while the contribution from Sgr A* was best fitted by a power law of index 2.7 and $N_H = 9.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. The *Chandra*-derived best-fit parameters (see Table 3 of Baganoff et al. 2001a) were used to evaluate, by convolving the model with *XMM-Newton* responses, the expected count rates in the 2–10 keV band before the flare. We obtained values very close to the measured ones (demonstrating that the contribution of the instrumental background is not a major influence for this region of high X-ray surface brightness), and therefore we adopted a similar model to fit *XMM-Newton* data.

We extracted MOS and PN count spectra from the $10''$ radius circular region centered on Sgr A* before and during the flare (last 900 s for MOS and last 700 s for PN). For the spectra before the flare, rebinned to have 30 counts per bin, we used the above model, for which we fitted all parameters simultaneously (tied) on MOS and PN data, apart from the

Sgr A* parameters, which were kept frozen to *Chandra* best-fit values (with the norm reduced by a factor of 0.6 to account for the encircled energy loss). Normalizations were left to vary untied between MOS and PN data to allow adjustment to different instrument background and residual normalization differences not accounted for by the responses, and we obtained the best-fit parameters reported in Table 1 (second column). The MOS spectrum, compared to the best-fit model, is reported in Figure 3. Allowing the normalization of the Sgr A* power law to vary freely in the fitting (with fixed slope at 2.7 and fixed N_H at $9.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$), we obtained a very low normalization value, indicating that this component, if present, cannot be disentangled from the first power law supposed to describe point sources and other residual background components. With a reduced χ^2 of 1.35 for 121 dof, the fit is acceptable. The best-fit parameters match well the values obtained by *Chandra*; in particular, the gas temperature kT of 1.3 keV and its column density are fully compatible with *Chandra* results, while the power-law spectrum for the point sources is slightly flatter and needs a rather higher N_H . In the procedure we adopted, this power law also describes the background, and we do not expect it to fully represent the point sources contribution.

We then fixed these parameters, let free the Sgr A* power-law slope and normalization, and fitted the spectrum extracted during the flare. The fit was performed simultaneously on MOS and PN data of the flare, rebinned to have 10 counts per bin, and fixing the column density to the value measured by *Chandra*. The power-law normalizations for MOS and PN data were left untied, since a different portion of the flare was seen by MOS and PN cameras, and we expect different average intensity. We obtained the parameters reported in Table 1 (third column). The MOS count spectrum during the flare and its best-fit model are shown in Figure 3, compared with the MOS spectrum before the flare. The power-law photon index of the flaring source is 0.9 ± 0.5 (error at 1σ for one interesting parameter), which is significantly harder than the spectrum measured with *Chandra* during the quiescent state (2.7 ± 1.0) and rather compatible, within uncertainties, to the index measured

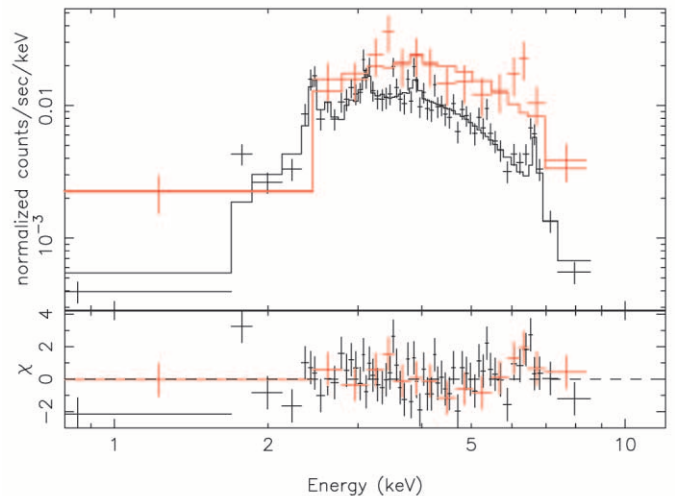


Fig. 3.—MOS count spectra extracted from a region of $10''$ radius around Sgr A* before the flare (black, bottom data point set) and during the 900 s flare (red, top data point set) compared with the best-fit models of Table 1.

TABLE 1
SPECTRAL FIT TO X-RAY EMISSION FROM WITHIN $10''$ FROM SGR A*

Parameter	Spectrum before the Flare ^a	Spectrum during the Flare ^b
Optically thin thermal plasma: ^c		
N_H (10^{22} cm^{-2})	$11.1^{+0.6}_{-0.6}$	11.1
kT (keV)	$1.31^{+0.08}_{-0.07}$	1.31
Norm MOS (10^{-3} cm^{-5}) ^d	$4.6^{+1.0}_{-1.0}$	4.6
Norm PN (10^{-3} cm^{-5}) ^d	$3.6^{+0.9}_{-0.7}$	3.6
Power law for point sources:		
N_H (10^{22} cm^{-2})	$21.2^{+6.2}_{-4.7}$	21.2
Photon index	$2.1^{+0.3}_{-0.2}$	2.1
Norm MOS ($10^{-4} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$) ^e	$6.8^{+6.0}_{-3.8}$	6.8
Norm PN ($10^{-4} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$) ^e	$6.3^{+5.5}_{-3.5}$	6.3
Power law for Sgr A*:		
N_H (10^{22} cm^{-2})	9.8	9.8
Photon index	2.7	$0.9^{+0.5}_{-0.3}$
Normal MOS ($10^{-4} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$) ^e	2.1	$2.0^{+2.3}_{-1.3}$
Norm PN ($10^{-4} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$) ^e	2.1	$0.6^{+0.9}_{-0.4}$
Goodness of fit:		
χ^2_ν (dof)	1.35 (121)	0.90 (27)

NOTE.—Parameters without errors are fixed. Errors are at 68.3% confidence interval for one interesting parameter.

^a Spectrum from within $10''$ of Sgr A* integrated in the period before the flare.

^b Spectrum from within $10''$ of Sgr A* integrated in the period during the flare.

^c Raymond & Smith (1977) model with twice solar elemental abundances.

^d Normalization in units of $10^{-14} \int n_e n_i dV / 4\pi D^2$, where n_e and n_i are the electron and ion densities (cm^{-3}) and D is the distance to the source (cm).

^e Flux density at 1 keV.

during the 2000 October flare. By allowing the column density to vary freely during the fit, we obtained a lower value for Sgr A* ($N_H = 6.4^{+4.0}_{-3.3} \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$) and an even harder slope. This value is consistent with the value determined by *Chandra* and that we use to fix the column density in the fits.

Similar parameters were obtained by simply using the spectra extracted before the flare as background components for the flare spectra. After subtraction of the nonflaring count spectrum, the flaring spectrum was fitted with a simple absorbed power law with N_H fixed to the *Chandra*

measured value and leaving the MOS and PN normalizations untied. Results are reported in Table 2 (second column) and the derived spectra plotted in Figure 4. We obtained a photon index of $0.68^{+0.53}_{-0.60}$, compatible with the estimate reported in Table 1. This procedure subtracts from the flare spectrum the nonflaring component of Sgr A* and therefore assumes that the quiescent emission from Sgr A* is negligible. This is an acceptable approximation since, if the emission level of Sgr A* is comparable to the one observed by *Chandra* in 1999, it is expected to contribute by only $\approx 5\%$ to the counts of the flare spectrum. On the other hand, this procedure allows one to subtract the diffuse emission present in the region of the spectral extraction and the instrumental background in a model-independent way. In any case, the above results and derived fluxes are equivalent, within errors, to those obtained adding a power-law component to the nonvariable emission model. To directly compare our results with the spectra of the Sgr A* flare observed with *Chandra*, we also fitted the above spectra with an absorbed power-law model modified by the effect of dust scattering (Predehl & Schmitt 1995). We fixed the parameter of the dust-scattering model, the visual extinction A_V , to the Galactic center canonical value of 30 mag and the column density for absorption to $N_H = 5.3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, as found by Baganoff et al. (2001b). We then fitted the model on the MOS and PN spectra during the flare using the spectra before the flare as a background component. The best fit is found for an even harder power-law slope of 0.31 (see Table 2, third column). Letting the N_H vary freely, we again find a best-fit value for the column density around $(5-6) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$.

To compute the observed flux and luminosity, we used the normalization value derived from the MOS data, since the MOS observed a bigger fraction of the flare, and we

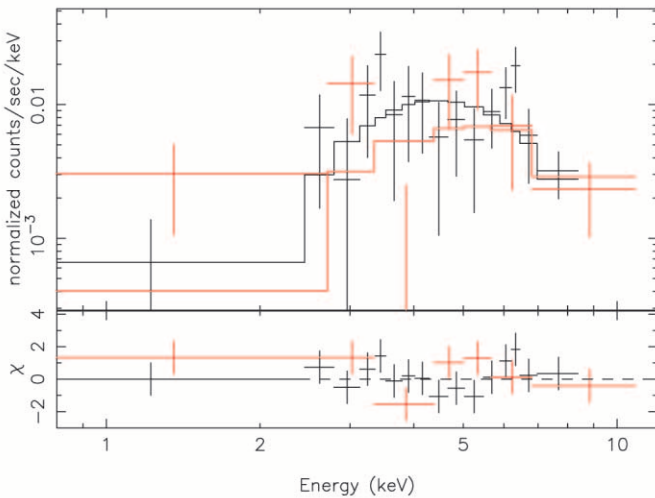


FIG. 4.—Count spectra from MOS (black data point set) and PN (red data point set) data, extracted from a region of $10''$ radius around Sgr A* during the flare after subtraction of the nonflaring spectra. The spectra are compared to the best-fit model of an absorbed power law without dust scattering (see Table 2).

TABLE 2
SPECTRAL FIT TO X-RAY EMISSION FROM WITHIN $10''$ FROM SGR A* DURING THE FLARE

Power-Law Model	No Dust Scattering	Dust Scattering ^a
N_H (10^{22} cm^{-2})	9.8	5.3
Photon index.....	$0.7^{+0.5}_{-0.6}$	$0.3^{+0.6}_{-0.4}$
Norm MOS ($10^{-4} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$) ^b	$1.3^{+2.0}_{-1.3}$	$0.7^{+1.0}_{-0.4}$
Norm PN ($10^{-4} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$) ^b	$0.3^{+0.6}_{-0.3}$	$0.2^{+0.3}_{-0.1}$
$\chi^2_{\nu}(\text{dof})$	0.98 (20)	0.95 (20)

NOTE.—Parameters without errors are fixed. Errors are at 68.3% confidence interval for one interesting parameter.

^a Scattering computed for fixed value of $A_V = 30$.

^b Flux density at 1 keV.

corrected for the fraction of encircled energy at a distance of $10''$ (60%). We note that we did not correct for the energy-dependence of the encircled energy, which will tend to slightly harden the spectrum; however, the statistical error is by far larger than the systematic bias induced by this procedure. The measured absorbed source flux in the 2–10 keV band is then of $(3.3 \pm 0.6) \times 10^{-12} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, equivalent to a 2–10 keV luminosity at 8 kpc of $(3.8 \pm 0.7) \times 10^{34} \text{ ergs s}^{-1}$ (1σ errors computed by fixing all other parameters, but the Sgr A* power-law normalization at the best-fit values listed in the third column of Table 1). This is the average value in the last 900 s, but the last light curve 180 s bin was about a factor of 1.4 higher; thus, the luminosity reached a value of $5.4 \times 10^{34} \text{ ergs s}^{-1}$.

These numbers are subject to large errors due to the low statistics available. But the general result that emerges is that the flare we detected presents a harder spectrum than the one measured with *Chandra* for Sgr A* during the quiescent period. The measured slope is even harder than that typically found in X-ray spectra of AGN; however, considering the large uncertainties, this result is not compelling.

3. DISCUSSION

The *XMM-Newton* discovery of a new X-ray flare of Sgr A* in 2001 September confirms the results obtained in the earlier *Chandra* observations. *XMM-Newton* observed only the first part of the flare, but the recorded event is fully compatible in intensity and timescale with the early phase of the flare seen by *Chandra*.

The count rate within $10''$ from Sgr A* increased in 900 s by a factor of 3, but if attributed to Sgr A*, it implies that this source brightened by a factor of about 20–30, which is compatible with the increase in the first 1000 s of the flare observed by *Chandra*. We have not detected the maximum in the flare rise. Therefore, we cannot strictly apply the travel light argument to estimate the size of the emitting region. If we assume that the flare duration (900 s) we observed is the shortest timescale of variation of the present event, it corresponds to a size of about $30R_g$. This limit is a factor of 1.5 larger than the shortest timescale estimated with the *Chandra* data and does not further constrain the geometry of the region.

On the other hand, the detection of another such a flare indicates that the event is not rare. The total reported observation time with *Chandra* amounts to ≈ 75 ks. Considering the *XMM-Newton* 26 ks exposure, the duty cycle of such event is $0.11 (= 11 \text{ ks}/101 \text{ ks})$, but it would increase to $0.18 (= 20 \text{ ks}/110 \text{ ks})$ if we assume that the flare we detected

for only 1000 s would last for 10 ks. Although not much different than the value determined with *Chandra*, this estimate of the active time fraction of the source is now based on two events, and it is therefore more significant.

The radio source, on the other hand, has been observed many times, and the detected flux variability has never exceeded a factor of 2 (Zhao, Bower, & Goss 2001). This implies that it is unlikely that radio or submillimeter emission present a comparable increase in flux. If this is confirmed, the flare may not be due to a change in the accretion rate, since this variation would lead, at least in models that attribute the bulk of X-ray emission to synchrotron self-Compton emission, to a comparable increase of radio and submillimeter radiation (Markoff et al. 2001).

The X-ray flare from Sgr A* cannot be explained by pure ADAF models (Narayan et al. 1998), as in these models the emission is due to thermal bremsstrahlung from the whole accretion flow and arises from an extended region (between 10^3 and $10^5 R_g$), which cannot account for such rapid variability. Models that predict emission from the innermost regions near the black hole involve a mechanism acting either at the base of a jet of relativistic particles (Markoff et al. 2001) or in the hot Keplerian flow present within the circularization radius of a spherical flow (Melia, Liu, & Coker 2001; Liu & Melia 2002). In both cases, a magnetic field is present in the flow and the submillimeter radiation is attributed to optically thin synchrotron emission from the inner region, while the X-rays are produced by the synchrotron self-Compton (SSC) mechanism whereby radio to millimeter photons are boosted to X-ray energies by the same relativistic or subrelativistic electrons that are producing the synchrotron radiation. Large flux variations can be produced by a change in accretion rate or, in the jet model, by additional heating of the electrons caused, for example, by magnetic reconnection. The second mechanism would increase (and harden) the X-ray flux without significantly increasing the radio and submillimeter part of the spectrum, and therefore it could be more compatible with the lower amplitude of radio changes compared to X-rays (Markoff et al. 2001).

However, even emission from a circularized flow can provide low- or anticorrelation of the radio emission with the X-rays if the radiation mechanism for the X-rays is bremsstrahlung rather than SSC (Liu & Melia 2002). The submillimeter and far-IR domain, on the other hand, would in this case show a large correlated increase, but at these frequencies, the measurements have not been frequent enough to settle the issue. Although the exact modeling of radiation process depends on viscosity behavior and other uncertain

details, the observed hardening of the spectrum during the flare indeed favors the bremsstrahlung emission mechanism in this model rather than the SSC one (Liu & Melia 2002). More compelling constraints on the models will be set when simultaneous observations in radio/submillimeter and X-ray wavelengths of such a flare are obtained.

Correlated radio and X-ray observations are indeed crucial because, although the amplitude of the radio variability is low compared to the event recorded in X-rays, an intriguing correlation seems to be present between the X-ray flares and the rise of the radio emission. Indeed, Zhao et al. (2001), using Very Large Array (VLA) data collected over two decades, detected a periodicity in the Sgr A* radio variability, with a 106 day cycle and a characteristic timescale of 25 days. Baganoff et al. (2001b) already remarked that the 2000 October X-ray flare occurred at a radio-cycle phase corresponding to the beginning of the radio peak. We have computed the 106 day radio-cycle phase of the X-ray flare that we detected with *XMM-Newton* and found that it differs by only 6 days from the phase of the flare detected with *Chandra*. The flare occurred at day 64 in the light curve of Figure 3 of Zhao et al. (2001), while the *Chandra* flare took place at phase 70 day, and the 1.3 cm radio peak rise extends roughly from day 55 to 75. Even though the light-curve radio peak is wide and several other structures are present, both X-ray flares detected until now are very close in phase and take place during the rising part of the main radio flare. We have also compared the time of the flare to a recent radio light curve of Sgr A* obtained at 1.3 and 2 cm with the VLA between 2001 March and November (Yuan & Zhao 2003). The X-ray flare occurred 1–2 days after a local maximum of the curve,

but no radio data points are reported for the day when our *XMM-Newton* observation took place.

It will be also important to study the shape of the flare spectrum at energies higher than 10 keV to fully understand the radiation mechanism producing the high-energy tail. In particular, by measuring the high-energy cutoff of the spectrum, one could determine the electron temperature for a thermal emission or the Lorentz factor for nonthermal processes. We estimated that such a flare should be marginally visible in the range 10–60 keV with the low-energy instruments on board the new gamma-ray mission *International Gamma-Ray Astrophysical Laboratory (INTEGRAL)*, launched in 2002 October, if the spectrum extends to these energies with the slope observed with *Chandra* and *XMM-Newton*.

Our more secure estimation of the duty cycle of the flares shows that multiwavelength observations of Sgr A* that involve *XMM-Newton* or *Chandra* will have a good chance of observing an X-ray flare, provided the simultaneous coverage is of the order of 100 ks.

This paper is based on observations with *XMM-Newton*, an ESA science mission with instruments and contributions funded by ESA member states and the USA (NASA). This observation was performed as part of the *XMM-Newton* guaranteed time program of the *XMM-EPIC* team. We wish to thank all *XMM-Newton* staff involved in the realization and operation of the mission. F. D. acknowledges financial support from a postdoctoral fellowship from the French Spatial Agency (CNES). We thank the referee Frederick Baganoff for his stimulating comments and suggestions. We also thank Ruby Krishnaswamy for help with installation of data analysis software.

REFERENCES

- Baganoff, F., et al. 2001a, *ApJ*, submitted (astro-ph/0102151)
 ———. 2001b, *Nature*, 413, 45
 Genzel, R., Eckart, A., Ott, T., & Eisenhauer, F. 1997, *MNRAS*, 291, 219
 Ghez, A. M., Morris, M., Becklin, E. E., Tanner, A., & Kremenek, T. 2000, *Nature*, 407, 349
 Goldwurm, A. 2001, in *Proc. 4th INTEGRAL Workshop* (ESA-SP 459; Noordwijk: ESA), 455
 Jansen, F., et al. 2001, *A&A*, 365, L1
 Kirsch, M. 2002, *XMM-EPIC Status of Calibrations and Data Analysis*, *XMM-SOC Documentation* (Vilspa: ESA-SOC)
 Liu, S., & Melia, F. 2002, *ApJ*, 566, L77
 Markoff, S., Falcke, H., Yuan, F., & Biermann, L. 2001, *A&A*, 379, L13
 Melia, F., & Falcke, H. 2001, *ARA&A*, 39, 309
 Melia, F., Liu, S., & Coker, R. F. 2001, *ApJ*, 553, 146
 Narayan, R., Mahadevan, R., Grindlay, J. E., Popham, R. G., & Gammie, C. 1998, *ApJ*, 492, 554
 Predehl, P., & Schmitt, J. H. M. M. 1995, *A&A*, 293, 889
 Predehl, P., & Trümper, J. 1994, *A&A*, 290, L29
 Raymond, J. C., & Smith, B. W. 1977, *ApJS*, 35, 419
 Strüder, L., et al. 2001, *A&A*, 365, L18
 Turner, M. J. L., et al. 2001, *A&A*, 365, L27
 Warwick, R. S. 2003, in *Proc. New Visions of the X-Ray Universe in the XMM-Newton and Chandra Era*, ed. F. Jansen (ESA-SP; Netherlands: ESTEC), in press (astro-ph/0203333)
 Yuan, F., & Zhao, J. 2003, *Chinese J. Astron. Astrophys.*, in press (astro-ph/0203050)
 Yusef-Zadeh, F., Choate, D., & Cotton, W. 1999, *ApJ*, 518, L33
 Zhao, J., Bower, G. C., & Goss, W. M. 2001, *ApJ*, 547, L29

DETECTION OF HARD X-RAY EMISSION FROM THE GALACTIC NUCLEAR REGION WITH *INTEGRAL*¹

G. BÉLANGER,² A. GOLDWURM,² P. GOLDONI,² J. PAUL,² R. TERRIER,² M. FALANGA,² P. UBERTINI,³ A. BAZZANO,³
 M. DEL SANTO,³ C. WINKLER,⁴ A. N. PARMAR,⁴ E. KUULKERS,⁴ K. EBISAWA,⁵ J. P. ROQUES,⁶
 N. LUND,⁷ AND F. MELIA⁸

Received 2003 October 23; accepted 2003 December 1; published 2004 January 23

ABSTRACT

This Letter presents the first results of an observational campaign to study the Galactic center with *INTEGRAL*, the *International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*. Mosaicked images were constructed using data obtained with ISGRI, the soft gamma-ray instrument of the coded aperture IBIS imager, in the energy ranges 20–40 and 40–100 keV. These give a yet unseen view of the high-energy sources of this region in hard X-rays and gamma rays with an angular resolution of 12' (FWHM). We report on the discovery of a source, IGR J1745.6–2901, coincident with the Galactic nucleus Sgr A* to within 0.9'. Located at R.A. = 17^h45^m38.5 (J2000.0), decl. = –29°01'15" (J2000.0), the source is visible up to about 100 keV with a 20–100 keV luminosity at 8 kpc of $(2.89 \pm 0.41) \times 10^{35}$ ergs s^{–1}. Although the new *INTEGRAL* source cannot unequivocally be associated to the Galactic nucleus, this is the first report of significant hard X-ray emission from within the inner 10' of the Galaxy and a contribution from the Galactic supermassive black hole itself cannot be excluded.

Subject headings: black hole physics — Galaxy: center — Galaxy: nucleus — gamma rays: observations — stars: neutron — X-rays: binaries

1. INTRODUCTION

From the prediction of the existence of a massive compact source at the center of the Milky Way by Lynden-Bell & Rees (1971) to the discovery of such a source in the radio domain 3 years later by Balick & Brown (1974) and to the first detection of soft X-rays unmistakably attributable to it by *Chandra* in 1999 (Baganoff et al. 2003), the supermassive black hole candidate Sgr A* and the Galactic center (GC) region as a whole have been put under intense scrutiny for many years from radio wavelengths to gamma rays. This has led to several discoveries and advances in our understanding of the processes and interactions at the heart of the Milky Way. For example, it is now known that the soft X-ray emission (<10 keV) in the central 10' is heavily dominated by diffuse emission due primarily to hot gas (Koyama et al. 1996; Sidoli & Mereghetti 1999) and that only about 10% of the total emission in this energy range can be accounted for by X-ray point sources brighter than 10³¹ ergs s^{–1} (Muno et al. 2003b). Also, the contribution of point sources in this domain is about the same along the Galactic ridge as it is in the GC (Ebisawa et al. 2001).

The Galactic nuclear region consists of six primary components that give rise to an array of complex phenomena through their mutual interactions. These constituents are Sgr A*, a supermassive black hole with a mass of around $3.5 \times 10^6 M_{\odot}$ (Schödel et al. 2002; Ghez et al. 2004a); the surrounding cluster of evolved and young stars; ionized gas streamers, some of which

form a three-armed spiral centered on Sgr A* known as Sgr A West; a molecular dusty ring surrounding Sgr A West; diffuse hot gas; and a powerful supernova-like remnant known as Sgr A East (Melia & Falcke 2001). Furthermore, both the IR and the X-ray point source populations decrease in spatial density approximately as $1/R^2$, where R is the distance from the GC (Serabyn & Morris 1996; Muno et al. 2003b).

The first imaging observations of the GC in hard X-rays were performed by the X-ray telescope on *Spacelab 2* in the range 2.5–20 keV with an angular resolution of 3'. A source located within 1.1' of Sgr A* was detected (Skinner et al. 1987). Such a source was also detected by ART-P (8–20 keV) on the *Granat* satellite in 1990–1991 (Pavlinsky, Grebenev, & Sunyaev 1994). At energies above 20 keV, only the coded mask instrument SIGMA/*Granat*, sensitive to energies above 35 keV, provided imaging capability with a ~20' angular resolution, allowing an exploration of the dense GC region. In spite of the deep 9×10^6 s SIGMA survey of the central parts of the galaxy performed between 1990 and 1997, only upper limits were set for the hard X- and gamma-ray emission from the neighborhood of Sgr A* at energies above 35 keV (Goldwurm et al. 1994; Goldoni et al. 1999). The derived low bolometric luminosity of the Galactic nucleus (GN), in contrast with the powerful output from active galactic nuclei or black hole binaries, has motivated the development of several models for radiatively inefficient accretion onto or ejection from Sgr A*. These models have been widely applied to other accreting systems (Melia & Falcke 2001).

A recent breakthrough discovery by *Chandra* and *XMM-Newton* is that Sgr A* is the source of powerful X-ray flares (Baganoff et al. 2001; Goldwurm et al. 2003a; Porquet et al. 2003) during which the soft X-ray luminosity can increase by factors of 50–180 over a period of up to 3 hr. Some of these X-ray flares feature a significant hardening of the spectrum up to photon indices of ~1. Furthermore, a very recent discovery with the Very Large Telescope NAOS/CONICA imager (Genzel et al. 2003) and the Keck telescope (Ghez et al. 2004b) is that Sgr A* is also the source of frequent IR flares. This activity could indicate the presence of an important population of non-thermal electrons in the vicinity of the black hole. These results

¹ Based on observations with *INTEGRAL*, an ESA project with instruments and science data center funded by ESA member states (especially the PI countries: Denmark, France, Germany, Italy, Switzerland, and Spain), the Czech Republic, and Poland, and with the participation of Russia and the US.

² Service d'Astrophysique, DAPNIA/DSM/CEA, 91191 Gif-sur-Yvette, France; belanger@cea.fr.

³ IASFC-CNR, I-00133 Rome, Italy; ubertini@rm.iasf.cnr.it.

⁴ ESA, ESTEC, NL-2200 AG Noordwijk, Netherlands; christoph.winkler@rssd.esa.int.

⁵ ISDC, CH-1290 Versoix, Switzerland; ebisawa@obs.unige.ch.

⁶ CESR, Toulouse Cedex 4, France; roques@sigma-0.cesr.cnes.fr.

⁷ DSRI, DK-2100 Copenhagen Ø, Denmark; nl@dsri.dk.

⁸ Department of Physics and Steward Observatory, University of Arizona, Tucson, AZ 85721; melia@physics.arizona.edu.



FIG. 1.—Milky Way's center seen in a $2^\circ \times 2^\circ$ field by the IBIS/ISGRI instrument in the energy ranges 20–40 keV (*top*) and 40–100 keV (*bottom*). Each image pixel size is equivalent to about $5'$. Ten contour levels mark isosignificance linearly from about 4σ to 15σ .

have raised great interest in the possibility of observing hard X-rays from the GN, a measure of which may particularly shed light on the relative role of accretion and ejection in the Sgr A* system.

This Letter presents preliminary results of an observation campaign to study the GC at high energies with *INTEGRAL*, the *International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*, performed during the *INTEGRAL* Galactic Center Deep Exposure (GCDE) program in the spring of 2003. The focus is set on the inner $10'$ – $15'$ of the Galaxy and, more particularly, on the detection of a significant excess in this region. The results are based on data obtained with the *INTEGRAL* Soft Gamma-Ray

Imager (ISGRI), the low-energy camera of the main Imager on Board the *INTEGRAL* Satellite (IBIS), proven to be accurate between 20 and 200 keV. The morphology of the central 2° in the 20–100 keV band and the derived positions of close-by high-energy sources are briefly discussed to elucidate the experimental context from which the results on the central source are drawn.

2. OBSERVATIONS AND RESULTS

INTEGRAL (Winkler 2003) is a European Space Agency observatory that began its mission on 2002 October 17 carrying four instruments. These consist of two main ones, IBIS (Ubertini et al. 2003) and SPI, the Spectrometer on *INTEGRAL* (Vedrenne et al. 2003), and two monitors, JEM-X (Lund et al. 2003) and OMC (Mas-Hesse et al. 2003).

The IBIS coded mask instrument is characterized by a wide field of view (FOV) of $29^\circ \times 29^\circ$ ($9^\circ \times 9^\circ$ fully coded), a point spread function (PSF) of $12'$ (FWHM), and a sensitivity over the energy range between 15 keV and 8 MeV. This sensitivity is achieved via two detector layers: ISGRI (Lebrun et al. 2003), an upper CdTe layer sensitive between 15 keV and 1 MeV with peak sensitivity between 15 and 200 keV, and PICsIT, a bottom CsI layer, sensitive between 200 keV and 8 MeV.

We have analyzed IBIS/ISGRI data collected between 2003 February 28 and May 1 in a series of fixed pointings lasting about 37 minutes each. These include all GCDE data for which the pointings include the GN (~ 625 ks) and two Target of Opportunity observations (~ 475 ks). Data reduction was performed using the standard OSA 2 *INTEGRAL* Science Data Center analysis software (Goldwurm et al. 2003b), whose present version of the analysis procedures and calibration files does not allow for a full correction of systematic effects. Thus, in order not to overestimate the detection level of a source, taking into account fluctuations in the observation-dependent background noise levels as well as systematics, the significance was normalized to the fitted width of the distribution of individual significances in the image. This straightforward normalization procedure ensures that 68% of the distribution of significance values in the image are indeed contained within 1σ of the mean. Image reconstruction can be summarized as follows: from the events list for a pointing, subsets of events are selected according to energy bins. Each subset is used to build a detector image or shadowgram. Convolution of the shadowgram with a decoding array gives rise to a sky image containing the main peak of all sources in the FOV and their secondary lobes. Source identification and subtraction of secondary lobes results in the final reconstructed sky image. Fluxes are derived using *INTEGRAL* observations of the Crab Nebula performed just prior to the start of the GCDE, and luminosity calculations are based on a distance of 8 kpc to the GC assuming a Crab spectrum of a power law with photon index 2.12 and flux density at 1 keV of $8 \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ (Bartlett 1994).

The maps of the GC shown in Figure 1 were constructed by summing the reconstructed images of 571 individual exposures. The total effective exposure time is about 8.5×10^5 s on the GN. In these signal-significance maps of the central 2° of the Galaxy where 10 contour levels mark isosignificance linearly from about 4σ up to 15σ , we can see what appear to be six distinct sources: 1E 1740.9–2942.7, KS 1741–293, A1742–294, 1E 1743.1–2843, and SLX 1744–299/300, whose nominal positions are marked by plus signs and identification is still preliminary, and a source coincident with the radio position of Sgr A*. 1E 1740.7–2942 is a black hole candidate, KS

TABLE 1

SOURCES DETECTED BY *INTEGRAL* NEAR THE GALACTIC CENTER

Source Name	Significance	Fitted Position (R.A., decl.)	Offset ^a (arcmin)
1E 1740.7–2942	70.0	265.98, –29.74	0.32
KS 1741–293	18.9	266.23, –29.32	2.31
A1742–294	15	266.52, –29.51	0.05
SLX 1744–299/300	9.6	266.86, –30.02	1.59
1E 1743.1–2843	9.2	266.59, –28.67	3.96
Sgr A*	8.7	266.41, –29.02	0.86

^a Distance between the fitted and nominal source positions.

1741–293 and A1742–294 are neutron star low-mass X-ray binary (LMXB) bursters, SLX 1744–299/300 are in fact two LMXBs separated by only 2′/2, and 1E 1743.1–2843 is an X-ray source whose nature is still uncertain. In the 20–40 keV band, contours of the central source peak at the position of Sgr A* with a significance level of 8.7σ but are elongated toward GRS 1741.9–2853. This suggests some contribution from this transient neutron star LMXB burster system recently observed to have returned to an active state (Muno, Baganoff, & Arabadjis 2003a) but could also be due to an uncorrected background structure. The central source is also marginally visible in the 40–100 keV band at a level of 4.7σ but without any contribution from the direction of GRS 1741.9–2853.

The position and flux of the central excess in the 20–40 keV map were determined by fitting the peaks with a function approximating the instrument’s PSF (Gros et al. 2003) in two different ways: (1) all the emission is attributed to one source and is fitted as such to determine its peak height and position, and (2) the emission is attributed to two sources: a new source and GRS 1741.9–2853, whose position is then fixed to the one determined with the *Chandra* observatory (Muno et al. 2003a). Both of these involve a simultaneous fit of all the sources in the 2 deg² field of the GC. In the first case, we obtain a source position of R.A. = 17^h45^m22^s.5 (J2000.0), decl. = –28°58′17″ (J2000.0) and a flux of about 5.4 mcrab or $(3.21 \pm 0.36) \times 10^{-11}$ ergs cm^{–2} s^{–1}. In the second, the position is R.A. = 17^h45^m38^s.5, decl. = –29°01′15″, and the flux is about 3.2 mcrab or $(1.92 \pm 0.36) \times 10^{-11}$ ergs cm^{–2} s^{–1}. The central source’s 40–100 keV peak position is in very good agreement with the one determined using the second method outlined above, and since there is clearly no visible contribution from a neighboring source, the 40–100 keV flux was extracted at that position. The estimated error on the position is of about 4′ for a detection at the significance level of 8.7σ . These positions are, respectively, 4′.6 and 0′.9 from the radio position of Sgr A*. The results of the fine position determination for the six above-mentioned GC sources are shown in Table 1. In Table 2, flux estimates for the central source are given adopting the result of the second method for position and flux determination. The hardness ratio (HR)—the ratio of the count rate in the high-energy band over that in the low-energy band—for the detected excess is 0.90 ± 0.20 . As a possible indication of the nature of the detected excess, we can compare the values of the HR to the two brightest sources in the field. The black hole candidate 1E 1740.7–2942 has an HR of 1.20 ± 0.03 , and the neutron star LMXB KS 1741–293 has a HR of 0.89 ± 0.08 .

The excess appears to be somewhat variable throughout the observations. In particular, we have detected a sudden increase in flux where the count rate rose by a factor of ~ 12 with respect to the mean for about 40 minutes. Figure 2 shows a portion of the light curve from the estimated 20–40 keV flux at the radio position of Sgr A*. Each data point corresponds to the

TABLE 2

IGR J1745.6–2901 FLUX AND INTEGRATED FLUX WITHIN 10′ OF Sgr A* FROM X-RAY INSTRUMENTS

Instrument	Energy (keV)	Energy Flux (10 ^{–11} ergs cm ^{–2} s ^{–1})	Energy Flux (mcrab)
<i>INTEGRAL</i>	20–40	1.92 ± 0.36	3.2 ± 0.6
	40–100	1.86 ± 0.40	3.4 ± 0.7
<i>XMM-Newton</i>	2–10 ^a	10.0	5.78
	20–40 ^b	0.61	1.03
	40–100 ^b	0.031	0.04
<i>BeppoSAX</i>	2–10 ^a	11	6.36
	20–40 ^c	0.89	1.49
	40–100 ^c	0.061	0.09

^a Measured.^b Extrapolated using $kT = 7.2$ keV.^c Extrapolated using $kT = 8.0$ keV.

average flux and statistical error from ~ 37 minute intervals during observations that lasted ~ 19 hr on 2003 April 6. Universal time is reported in *INTEGRAL* Julian days, i.e., days from 2000 January 1. The dashed line depicts the mean count rate over the entire data set. One peak clearly stands out at a pure statistical significance of 5σ , bearing in mind that this significance may be hampered by systematic effects. A simultaneous increase in flux is seen with a lower significance in the 40–100 keV light curve. In what follows we discuss a number of possible explanations for this detected excess.

3. DISCUSSION AND CONCLUSION

In attempting to identify the excess at R.A. = 17^h45^m38^s.5, decl. = –29°01′15″, we first consider which sources of high-energy emission can be excluded based solely on ISGRI’s error radius of 4′. There are four such sources: the radio arc located about 15′ from the GN; the nonthermal X-ray filaments associated with it and the dense molecular cloud G0.13–0.13 (Yusef-Zadeh, Law, & Wardle 2002); GRS 1743–290, observed by SIGMA in 1991 (Goldwurm et al. 1994); and GRS 1741.9–2853, mentioned above and clearly unable to account for the bulk of the excess.

Second, we argue that this detection cannot be attributed to both diffuse emission and point sources as thus far observed at low X-ray energies within 8′–10′ of Sgr A*. This is so because it is incompatible with the extrapolation at higher energies of the flux integrated over this region as measured by

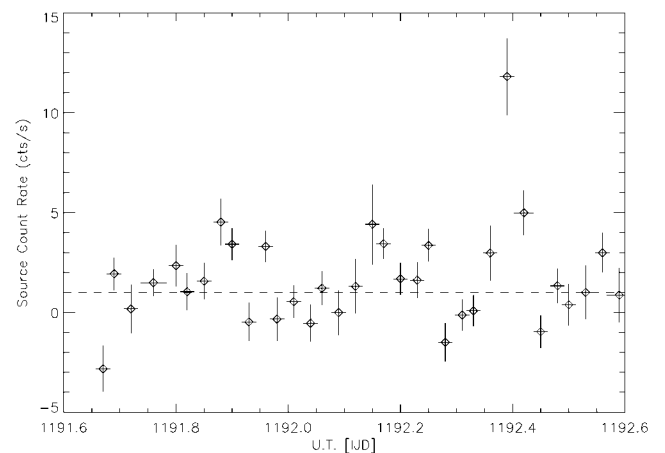


FIG. 2.—Portion of the total 20–40 keV light curve obtained by extracting the flux at the position of Sgr A* in the background-corrected intensity map of each elementary exposure. The statistical errors are shown, and the dashed line corresponds to the mean count rate over the entire data set.

XMM-Newton (A. Decourchelle 2003, private communication) and *BeppoSAX* (Sidoli et al. 1999). The analysis of 2001 *XMM-Newton* data in the 2–10 keV range consisted of integrating the total X-ray flux over a radius of 10' around Sgr A*. The resulting spectrum is best fitted by a two-temperature plasma model with $kT_1 = 0.6$ keV for the soft component and $kT_2 = 7.2$ keV for the harder one. 1997 *BeppoSAX* observations of the Sgr A complex over a radius of 8' around Sgr A* in the same energy band agree with *XMM-Newton*'s results. In this case the data are also best described by a two-temperature model with $kT_1 = 0.6$ keV and $kT_2 = 8$ keV. The extrapolation of the *XMM-Newton* and *BeppoSAX* results to higher energies was done using $kT = 7.2$ and 8 keV, respectively. Both instruments' direct measurements of the diffuse X-ray flux are consistent with those of *Chandra* (Baganoff et al. 2003) and ART-P (Sunyaev et al. 1993). Table 2 reports the *XMM-Newton* and *BeppoSAX* measurements as well as their respective extrapolations. Note that the variability timescale of the *INTEGRAL* source equally excludes a major diffuse contribution and also strongly suggests that accelerated charged particles in the expanding shell of Sgr A East (Melia et al. 1998) cannot significantly contribute to the detected signal.

Third, since the detected excess cannot be fully accounted for by diffuse emission and is variable, it is reasonable to consider it a point source, IGR J1745.6–2901, of 20–100 keV luminosity $\sim 3 \times 10^{35}$ ergs s⁻¹. One known point source found within 4' of IGR J1745.6–2901 that could contribute to the signal is the eclipsing burster AX J1745.6–2901 (Maeda et al. 1996; Sakano et al. 2002). This source lies about 1'3 from Sgr A* and was detected in a high state only once, in 1994 (Sakano et al. 2002). The extrapolation of the flux measured in that state is marginally compatible with that of IGR J1745.6–2901, and this only in the low-energy range. The last confirmed detection of AX J1745.6–2901 was in 1997 by *ASCA*, when it was found in a much lower flux state. It may have recently been detected by *Chandra*. A timing analysis of the *ASCA* data on AX J1745.6–2901 revealed a modulation with a 40% decrease in flux and period of 8.356 ± 0.008 hr (Maeda et al. 1996). 1997 *ASCA* data folded with that period show a slight dip, but since phase information could not be preserved over the 2.5 yr that separated the two observations, no unique solution for the period was found (Sakano et al.

2002). Folding the *INTEGRAL* data for IGR J1745.6–2901 with a period of 8.356 hr does not reveal any modulation.

Chandra observations of the GC performed on 2003 June 19 indicate that two sources, CXOGC J174540.0–290005 and CXOGC J174540.0–290014, found within 0'4 of Sgr A*, and another, CXOGC J174535.5–290124, lying 1'3 from Sgr A* and possibly the same as AX J1745.6–2901, had a combined intensity in the 2–8 keV band that was more than 30 times that of Sgr A* in its quiescent state on that day (F. K. Baganoff 2003, private communication). The GN was not particularly bright on June 19, but it must have been somewhat more active in May when an intense IR flare was observed to come from a region possibly very near the supermassive black hole's event horizon (Genzel et al. 2003).

It is noteworthy that the fairly hard X-ray source that ART-P detected in 1990 at the position of Sgr A* had a 8–20 keV flux that varied between about 5 and 11 mcrab (Pavlinisky et al. 1994). This is consistent with our detection in the 20–40 keV energy range. We also recall the 2 σ upper limits set by SIGMA on the 40–80 and 80–150 keV luminosity of the GN: 3.4×10^{35} and 2.8×10^{35} ergs s⁻¹, respectively (Goldoni et al. 1999), both of which are compatible with our detection.

Finally, *INTEGRAL* has detected a very hard X-ray source at a position coincident to within 1' with Sgr A*. Because of IBIS's 12' angular resolution, the emission from IGR J1745.6–2901 cannot be attributed to one specific object and could be made up of several contributing sources found within a couple of arcminutes of Sgr A*. Nonetheless, this remains the first detection of emission at energies greater than 20 keV from the very close vicinity of the GN, and a contribution from Sgr A* itself cannot be excluded.

More *INTEGRAL* data are needed to better constrain the position, spectral shape, variability properties, and the possibly multiple nature of IGR J1745.6–2901. We expect that the most constraining results will be provided by simultaneous observations in hard and soft X-rays with *INTEGRAL* and *XMM-Newton* or *Chandra*.

We gratefully thank François Lebrun for insightful suggestions and Anne Decourchelle for her analysis of *XMM-Newton* data on the GN.

REFERENCES

- Baganoff, F. K., et al. 2001, *Nature*, 413, 45
 ———. 2003, *ApJ*, 591, 891
 Balick, B., & Brown, R. L. 1974, *ApJ*, 194, 265
 Bartlett, L. M. 1994, Ph.D. thesis, NASA GSFC
 Ebisawa, K., et al. 2001, *Science*, 293, 1633
 Genzel, R., et al. 2003, *Nature*, 425, 934
 Ghez, A. M., et al. 2004a, *ApJ*, in press (astro-ph/0306130)
 ———. 2004b, *ApJ*, in press (astro-ph/0309076)
 Goldoni, P., et al. 1999, *Astrophys. Lett. Commun.*, 38, 305
 Goldwurm, A., et al. 1994, *Nature*, 371, 589
 ———. 2003a, *ApJ*, 584, 751
 ———. 2003b, *A&A*, 411, L223
 Gros, A., et al. 2003, *A&A*, 411, L179
 Koyama, K., et al. 1996, *PASJ*, 48, 249
 Lebrun, F., et al. 2003, *A&A*, 411, L141
 Lund, N., et al. 2003, *A&A*, 411, L231
 Lynden-Bell, D., & Rees, M. J. 1971, *MNRAS*, 152, 461
 Maeda, Y., et al. 1996, *PASJ*, 48, 417
 Mas-Hesse, M., et al. 2003, *A&A*, 411, L261
 Melia, F., & Falcke, H. 2001, *ARA&A*, 39, 309
 Melia, F., et al. 1998, *ApJ*, 508, 676
 Munro, M. P., Baganoff, F. K., & Arabadji, J. S. 2003a, *ApJ*, 598, 474
 Munro, M. P., et al. 2003b, *ApJ*, 589, 225
 Pavlinisky, M. N., Grebenev, S. A., & Sunyaev, R. A. 1994, *ApJ*, 425, 110
 Porquet, D., et al. 2003, *A&A*, 407, L17
 Sakano, M., et al. 2002, *ApJS*, 138, 19
 Schödel, R. et al. 2002, *Nature*, 419, 694
 Serabyn, E., & Morris, M. 1996, *Nature*, 382, 602
 Sidoli, L., & Mereghetti, S. 1999, *A&A*, 349, L49
 Sidoli, L., et al. 1999, *ApJ*, 525, 215
 Skinner, G. K., et al. 1987, *Nature*, 330, 544
 Sunyaev, R., et al. 1993, *ApJ*, 407, 606
 Ubertini, P., et al. 2003, *A&A*, 411, L131
 Vedrenne, G., et al. 2003, *A&A*, 411, L63
 Winkler, C. 2003, *A&A*, 411, L1
 Yusef-Zadeh, F., Law, C., & Wardle, M. 2002, *ApJ*, 568, L121

A PERSISTENT HIGH-ENERGY FLUX FROM THE HEART OF THE MILKY WAY: *INTEGRAL*'S VIEW OF THE GALACTIC CENTER¹

G. BÉLANGER,^{2,3} A. GOLDWURM,^{2,3} M. RENAUD,^{2,3} R. TERRIER,^{2,3} F. MELIA,⁴
 N. LUND,⁵ J. PAUL,^{2,3} G. SKINNER,⁶ AND F. YUSEF-ZADEH⁷

Received 2005 May 31; accepted 2005 August 17

ABSTRACT

Highly sensitive imaging observations of the Galactic center (GC) at high energies with an angular resolution of order $10'$ is a very recent development in the field of high-energy astrophysics. The IBIS/ISGRI imager on the *INTEGRAL* observatory detected for the first time a hard X-ray source, IGR J17456–2901, located within $1'$ of Sagittarius A* (Sgr A*) over the energy range 20–100 keV. Here we present the results of a detailed analysis of approximately 7×10^6 s of observations of the GC obtained since the launch of *INTEGRAL* in 2002 October. Two years and an effective exposure of 4.7×10^6 s have allowed us to obtain more stringent positional constraints on this high-energy source and to construct its spectrum in the range 20–400 keV. Furthermore, by combining the ISGRI spectrum with the total X-ray spectrum corresponding to the same physical region around Sgr A* from *XMM-Newton* data collected during part of the γ -ray observations, we constructed and present the first accurate wideband high-energy spectrum for the central arcminutes of the Galaxy. Our complete and updated analysis of the emission properties of the *INTEGRAL* source shows that it is faint but persistent with no variability above 3σ , contrary to what was alluded to in our first paper. This result, in conjunction with the spectral characteristics of the soft and hard X-ray emission from this region, suggests that the source is most likely not pointlike but rather that it is a compact yet diffuse nonthermal emission region. The centroid of IGR J17456–2901 is estimated to be R.A. = $17^{\text{h}}45^{\text{m}}42^{\text{s}}.5$, decl. = $-28^{\circ}59'28''$ (J2000.0), offset by $1'$ from the radio position of Sgr A* and with a positional uncertainty of $1'$. Its 20–400 keV luminosity at 8 kpc is $L = (5.37 \pm 0.21) \times 10^{35}$ ergs s^{–1}. A 3σ upper limit on the flux at the electron-positron annihilation energy of 511 keV from the direction of Sgr A* is set at 1.9×10^{-4} photons cm^{–2} s^{–1}. Very recently, the HESS collaboration presented the detection of a source of \sim TeV γ -rays also located within an arcminute of Sgr A*. We present arguments in favor of an interpretation that the photons detected by *INTEGRAL* and HESS arise from the same compact region of diffuse emission near the central black hole and that the supernova remnant Sgr A East could play an important role as a contributor of very high energy γ -rays to the overall spectrum from this region. There is also evidence for hard emission from a region located between the central black hole and the radio arc near $l \sim 0^{\circ}.1$ along the Galactic plane and known to contain giant molecular clouds.

Subject headings: black hole physics — Galaxy: center — Galaxy: nucleus — stars: neutron —
 X-rays: binaries — X-rays: general

1. INTRODUCTION

The year 2004 marked the 30th anniversary of the discovery of the compact radio source Sgr A* (Balick & Brown 1974), which is now firmly believed by many to be the manifestation of a supermassive black hole that sits at the very heart of the Milky Way and around which everything in the Galaxy turns. That year also marked the first detection of γ -rays from a compact region of size $\sim 10'$ around Sgr A* with the *INTEGRAL* (*International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*) observatory in the energy range from 20 to 100 keV (Béanger et al. 2004) and with

the HESS (High Energy Stereoscopic System) Cerenkov telescope array between 165 GeV and 10 TeV (Aharonian et al. 2004). After three decades of observations, we finally detected a source of very high energy radiation that appears to be pointlike and coincident with the Galactic nucleus (GN). However, the exact nature of the highly energetic emission from this compact region is unknown. Our aim here is to present observational evidence that will lead to a deeper understanding of the emission process and help to unfold the mystery of the γ -rays arriving from the heart of the Milky Way.

The Galactic nuclear region is very dense and complex—so dense that certainly more than one source could contribute to the high-energy flux detected by present-day γ -ray instruments with typical angular resolutions of $10'$ – $15'$. Located at 8 kpc from the Sun, the Galactic center (GC) harbors a supermassive black hole whose presence and mass of about $3.6 \times 10^6 M_{\odot}$ were deduced primarily from near-infrared (NIR) observations and measurements of the velocity and proper motion of the stars contained in the central cluster (Schödel et al. 2003; Ghez et al. 2005; Eisenhauer et al. 2005). A black hole of this mass has a Schwarzschild radius (R_{S}) of about 1.2×10^{12} cm and is expected to accrete matter from its nearby environment, producing a detectable emission in a broad range of frequencies (Melia & Falcke 2001). The bright, compact, nonthermal radio source Sgr A*, located at less than $0''.01$ from the dynamical center of the

¹ Based on observations with *INTEGRAL*, an ESA project with instruments and science data center funded by ESA member states (especially the PI countries: Denmark, France, Germany, Italy, Switzerland, and Spain), the Czech Republic, and Poland, and with the participation of Russia and the USA.

² Service d'Astrophysique, DAPNIA/DSM/CEA, 91191 Gif-sur-Yvette, France; belanger@cea.fr.

³ Unité mixte de recherche Astroparticule et Cosmologie, 11 place Berthelot, 75005 Paris, France.

⁴ Physics Department and Stewart Observatory, University of Arizona, Tucson, AZ 85721; melia@physics.arizona.edu.

⁵ Danish National Space Center, Juliane Maries vej 30, Copenhagen, Denmark; nl@spacecenter.dk.

⁶ CESR, Toulouse Cedex 4, France; skinner@cesr.fr.

⁷ Department of Physics and Astronomy, Northwestern University, Evanston, IL 60208.

central star cluster, is most likely the manifestation of such accretion processes. Undetectable in the visible and UV bands due to the large Galactic absorption, and only recently detected in the NIR in both quiescent and flaring states (Genzel et al. 2003; Ghez et al. 2004), this source is surprisingly weak in X-rays, where it appears slightly extended with a luminosity of only $L_X(2\text{--}10\text{ keV}) \approx 2 \times 10^{33}\text{ ergs s}^{-1}$ (Baganoff et al. 2003).

The dense central region of the Milky Way, where the 2–10 keV flux is heavily dominated by diffuse radiation, includes the emission from a hot ($kT \sim 6\text{--}8\text{ keV}$), probably unbound thermal plasma component, the supernova remnant (SNR) Sgr A East, several knots and filaments, and thousands of point sources (Maeda et al. 2002; Park et al. 2004; Munro et al. 2004a, 2004b). The faint X-ray counterpart of Sgr A* would likely have gone unnoticed were it not positioned almost exactly at the center of the Galaxy.

Following a monitoring of this faint X-ray source by the *Chandra* observatory, it was discovered that Sgr A* is the site of sometimes powerful X-ray flares (Baganoff et al. 2001). This flaring activity was also detected and studied with *XMM-Newton* (Goldwurm et al. 2003a; Porquet et al. 2003b; Bélanger et al. 2005), and the peak luminosity during these flares was seen to rise above quiescence by factors up to 180 and then decay in a few hours or less. The majority of flares have spectra that are significantly harder (power-law photon index $\Gamma \sim 1.5$) than the quiescent spectrum ($\Gamma \sim 2.7$), but the most powerful of them was quite soft ($\Gamma \sim 2.5$). Note that dust scattering can have some effect on the observed fluxes and spectral indices of both the quiescent and flaring states of Sgr A* (Tan & Draine 2004). Variations on timescales as short as 200 s have been detected during flares, indicating an emitting region with a size on the order of $10R_S$. Recent *Chandra* and *XMM-Newton* campaigns have allowed us to estimate the average X-ray flare rate to about 1 per day, bearing in mind that the flaring events appear to be clustered (Bélanger et al. 2005). At slightly longer wavelengths, NIR observations with the Very Large Array NACO imager (Genzel et al. 2003) and the Keck telescope (Ghez et al. 2004) have shown that Sgr A* is also the source of frequent IR flares with durations commensurable with those seen in X-rays. Some IR flares even appear to be simultaneous with X-ray flares (Eckart et al. 2004; Bélanger et al. 2005; Yusef-Zadeh et al. 2005). Both the IR and X-ray flaring events strongly suggest the presence of an important population of nonthermal relativistic electrons in the vicinity of the black hole horizon (Markoff et al. 2001; Liu & Melia 2002; Yuan et al. 2002, 2003; Liu et al. 2004), and therefore their detection has raised great interest in the possibility of observing hard X-rays from the GN.

Sgr A*'s bolometric luminosity from radio to X-rays (including the flares) barely amounts to a few $\times 10^{36}\text{ ergs s}^{-1}$, while the Eddington luminosity for a black hole of its mass reaches $L_E \approx 4 \times 10^{44}\text{ ergs s}^{-1}$. Even the expected accretion luminosity, based on an estimated stellar wind mass rate at the accretion radius, is on the order of $10^{42}\text{--}10^{43}\text{ ergs s}^{-1}$, i.e., about 6–7 orders of magnitude higher than Sgr A*'s total observed emitted power (see Cuadra et al. 2005 for a recent update on the issue).

In the 1990s it was thought that the bulk of the power could be found at higher energies: in hard X-rays, as is the case for black hole binaries in the hard state, or even at the electron-positron annihilation energy of 511 keV (see, e.g., Genzel & Townes 1987). Other than the detections in the 10–20 keV range from the direction of the GC based on *Spacelab 2* XRT (Skinner et al. 1987) and *Granat* ART-P (Pavlinisky et al. 1994) data, no detection at energies above 20 keV emanating from the Sgr A complex was reported. A long monitoring of the region by the SIGMA

telescope on the *Granat* satellite yielded upper limits on the order of several $10^{35}\text{ ergs s}^{-1}$ to the 35–150 keV emission from Sgr A* (Goldwurm et al. 1994; Goldoni et al. 1999), and $2.3 \times 10^{-4}\text{ photons cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ to the flux at 511 keV from a point source at the GC (Malet et al. 1995).

In the 100 MeV to 10 GeV energy range, an unidentified γ -ray source in the *Compton Gamma Ray Observatory* EGRET catalog was found to be somewhat compatible with the GN (Mayer-Hasselwander et al. 1998). In the third EGRET catalog (Hartman et al. 1999), this source, 3EG J1746–2851, is located $0^\circ.17$ from Sgr A*, and the reported error radius is $0^\circ.13$ at the 90% confidence level. Taking this at face value would marginally exclude Sgr A*. However, given the 1° angular resolution of the instrument and hence its inability to exclude the contribution from other sources contained in a region of this size, 3EG J1746–2851 is still considered to be possibly coincident with the GN.

Finally, *INTEGRAL* observations performed during the first half of 2003 with the IBIS telescope revealed for the first time the presence of a significant excess in the energy range 20–100 keV coming from the inner region of the Galaxy (Bélanger et al. 2004). The position of this excess was found to lie $1'$ from Sgr A* with a $4'$ error radius, and its luminosity was estimated to be $L_X(20\text{--}100\text{ keV}) \approx 3 \times 10^{35}\text{ ergs s}^{-1}$. An indication of variability on timescales comparable to those of flares in Sgr A* was reported, but a subsequent analysis that included data collected over the second half of 2003 with improved analysis procedures found the source to be stable (Goldwurm et al. 2004). In 2003 June, *Chandra* detected two new transient sources in the close vicinity of Sgr A*. Given the $12'$ resolution of the *INTEGRAL* IBIS telescope, the possibility that the 20–100 keV excess was linked to the emission from these objects was considered and discussed by Bélanger et al. (2004).

Meanwhile, the HESS collaboration (Aharonian et al. 2004) announced the detection of a bright source of TeV photons coincident with Sgr A* to within $1'$. The source appears to be pointlike and stable, with a power-law spectrum index of 2.2 and a luminosity of $L_\gamma(1\text{--}10\text{ TeV}) \approx 10^{35}\text{ ergs s}^{-1}$.

This wealth of high-energy data all point to the presence of one or several high-energy nonthermal emission components likely produced by accelerated particles in the environment of the GC. Both leptonic and hadronic origins for the accelerated particles giving rise to the γ -rays have been considered either in the inner (Markoff et al. 1997; Aharonian & Neronov 2005a) or outer (Atayan & Dermer 2004) region of Sgr A*, while Melia et al. (1998), Fatuzzo & Melia (2003), and recently Crocker et al. (2005) discussed the possibility that the site of particle acceleration could be the unusual supernova remnant Sgr A East.

Sgr A East is a mixed-morphology SNR whose center is less than $1'$ from Sgr A* and whose radio shell spans a few arcminutes. Given its position and dimensions, it would appear like a stable pointlike source for γ -ray observatories. This remnant is characterized by a nonthermal radio shell, at the center of which lies an apparently ejecta-dominated X-ray emitting region whose spectrum indicates that the plasma is rich in heavy elements, especially toward the core, where Fe abundances reach 4–5 times solar (Maeda et al. 2002; Sakano et al. 2004). For this reason, it has been classified as a metal-rich mixed-morphology SNR. The fact that Sgr A East is the smallest of the known SNRs of this type and that its radio shell appears to be quite symmetrical, although slightly elongated along the Galactic plane, suggests that the ejecta from the explosion have expanded in a very dense but more or less homogenous environment (Maeda et al. 2002). According to a more recent analysis of the X-ray features of

Sgr A East by Sakano et al. (2004) based on *XMM-Newton* observations, the derived total energy, mass, and abundance pattern are consistent with a single supernova event of Type Ia or Type II involving a relatively low mass progenitor star. Furthermore, according to these authors the morphology and spectral characteristics do not show evidence of a clear connection between the SNR and past activity in Sgr A*.

Sgr A East may very well have arisen from a single explosion akin to most other supernova events in terms of its energetics, as is suggested by Sakano et al. (2004). The most recent simulations of its genesis and evolution (Fryer et al. 2005) indicate that the progenitor was likely a star of mass $\sim 15 M_{\odot}$ that exploded a mere ~ 1750 years ago. Reaching the M–0.02–0.07 cloud some 300–400 years ago, the expanding shock collided with the dense molecular gas, producing a bright flash of 2–200 keV emission lasting several hundred years, whose X-ray echo we may be viewing today in the form of Fe fluorescent emission from Sgr B2 (and other nearby clouds). However, Sgr A East does distinguish itself from other Galactic remnants in three important ways. First, it is located very near the GC, within $50''$ of Sgr A*, and is therefore subject to interactions and forces uncommon in the rest of the Galaxy. Second, its nonthermal shell emission caused by synchrotron radiation from relativistic electrons has an unusually high surface brightness compared to other Galactic SNRs (Green 2004). Third, OH (1720 MHz) maser emission detected in several locations around the GC, and particularly at the boundary of Sgr A East and the M–0.02–0.07 molecular cloud, indicates the presence of strong shocks where rapid acceleration of electrons (and protons) is taking place, in a medium threaded by very strong magnetic fields of order 2–4 mG (Yusef-Zadeh et al. 1996). As pointed out by Yusef-Zadeh et al. (2000), the presence of relativistic electrons and strong magnetic fields within Sgr A East makes it a unique and potentially powerful Galactic accelerator.

Other possible sources of nonthermal γ -rays, some of which were initially proposed to explain certain features of the X-ray emission, such as the hot component and the bright 6.4 keV line of neutral Fe, or the nonthermal radio characteristics of the region, include the radio arc, several nonthermal filaments, and regions marked by cosmic-ray electron interactions (Yusef-Zadeh et al. 2002), supernova ejecta (Bykov 2002), and scattering of highly energetic radiations from molecular clouds. In particular, Revnivtsev et al. (2004) proposed a model in which the *INTEGRAL* source IGR J17475–2822, coincident with the dense molecular cloud Sgr B2, is due to Compton reflection (i.e., the scattering of high-energy photons by cold electrons in the outer layers of the cloud) of highly energetic emission from a very powerful flare in the Sgr A* system about 300 years ago. In any case, none of the current models can integrate the three high-energy sources (IGR J17456–2901, 3EG J1746–2851, HESS J1745–290) detected near the GC in a comprehensive manner.

We report here a complete study of the 2003–2004 *INTEGRAL* IBIS data of the GC, aiming to depict in detail the morphology of this interesting region in the energy range 20–400 keV and to present the properties of the central source IGR J17456–2901. The *INTEGRAL* observatory monitored the GC region for all of 2003 and 2004, including some dedicated programs specifically planned to study the properties of the GN. An important goal of this study was to search for correlated variability between the X-rays from Sgr A* and the higher energy emission from the central *INTEGRAL* source.

We describe the observations and data reduction methods in §§ 2 and 3. Our results, presented in § 4, include those of the

TABLE 1
OBSERVATION LOG

Period ^a	Start Time (UT)	End Time (UT)	Pointings	Exposure (Ms)
2003 spring	2003 Feb 28	2003 Apr 22	413	0.67
2003 fall	2003 Aug 18	2003 Oct 16	805	2.20
2004 spring	2004 Feb 7	2004 Apr 21	550	1.01
2004 fall	2004 Aug 28	2004 Sep 17	262	0.53

^a “Spring” and “fall” are loosely used to designate the first and second parts of the year, respectively.

multiwavelength campaign on Sgr A* performed in 2004 pertaining to *INTEGRAL* (§ 4.4). Finally, we discuss some of their implications in § 5.

2. OBSERVATIONS

The *INTEGRAL* observatory carries two main γ -ray instruments, IBIS and SPI, working in the energy range 15 keV to 10 MeV (Winkler 2003). Since its launch, *INTEGRAL* has observed the central degrees of our Galaxy for a total of about 7 Ms. This time was divided between the Galactic Center Deep Exposure and Galactic Plane Scan core programs, and Guest Observer (GO) observations. In particular, we include here analysis of GO programs performed in 2003 and in 2004 specifically dedicated to the GN. The 2004 GO program (~ 600 ks) was part of a broad multiwavelength campaign driven by a *XMM-Newton* large project aimed at studying the flaring activity of Sgr A*.

The data that form the basis of this paper constitute a subset of all these observations selected such that the aim point is within 10° of the central black hole. We have performed a detailed analysis of 2174 pointings carried out between the end of 2003 February and 2004 October. Each pointing or science window (ScW) typically lasts between 1800 and 3600 s, during which the telescopes are aimed at a fixed direction in the sky. Table 1 gives a summary of the overall periods spanned by the observations.

With a total effective exposure time of 4.7 Ms at the position of Sgr A*, we have constructed high signal-to-noise ratio (S/N) images of the central degrees and the spectrum of the central source IGR J17456–2901 first detected by *INTEGRAL* in 2003 (Bélanger et al. 2004). The results presented here are based on data collected with the IBIS/ISGRI telescope (Ubertini et al. 2003; Lebrun et al. 2003) sensitive in the energy range between 15 and 1000 keV. The angular resolution of the high-energy (15 keV to 10 MeV) SPI telescope ($\sim 3^\circ$) is not sufficient to resolve the contribution of the high-energy sources known to be present in the central degrees of the Galaxy, and we have therefore not used these data.

The X-ray monitor on board *INTEGRAL*, JEM-X, has a smaller field of view than IBIS and SPI, and therefore the effective exposure at the location of Sgr A* is substantially lower (~ 500 ks for the data set considered in this paper). We analyzed the JEM-X data to produce mosaics for the GC, and we discuss the results below.

We have also made use of *XMM-Newton* data from the multiwavelength campaign on Sgr A* carried out in 2004 to construct the broadband high-energy spectrum of IGR J17456–2901 and to identify the X-ray and soft γ -ray components. A detailed description of the *XMM-Newton* observations during this campaign, and of the characteristics of the two factor-40 flares detected from the direction of Sgr A*, are presented in Bélanger et al. (2005).

3. DATA ANALYSIS METHODS

The basic IBIS/ISGRI data reduction for individual pointings was performed using the *INTEGRAL* Off-line Scientific Analysis software (OSA; ver. 4.2) delivered by the *INTEGRAL* Science Data Centre (Courvoisier et al. 2003) and whose algorithms are described in Goldwurm et al. (2003b) and Gros et al. (2003). Following the recommendations related to the use of the OSA software, we restricted our analysis to events with energies greater than 20 keV. A number of additional procedures were implemented in order to maximize the quality of our analysis given the large data set and the complexity of Galactic nuclear region. For instance, the analysis was consistently done twice: a first time to make a catalog of detected sources and perform a preliminary evaluation of the quality of each sky image, and a second time to ensure that all known sources in a given field of view were modeled correctly in the reconstruction of each sky image. The total number of sources detected by ISGRI within 10° of the GC and therefore included in the analysis input catalog is 80. The background maps were constructed from empty field observations at high latitudes in 256 bands from 17 to 1000 keV and incorporated into the standard analysis, where they were combined to match the chosen energy ranges. This procedure has allowed us to achieve the best possible quality for individual sky images and thus for the mosaic and spectrum. Other additional analysis procedures are detailed in the sections that follow.

3.1. Sky Maps, Light Curves, and Mosaics

For a coded mask instrument like IBIS, a sky image is obtained by convolving the detector image or shadowgram with a decoding array derived from the spatial characteristics of the mask. For each sky image there is an intensity map (I), a variance map (V) proportional to the total counts recorded in each pixel, and a significance map (S) constructed from these as $S = I/\sqrt{V}$. Given that source photons are a very small fraction of the total counts, the background heavily dominates and the histogram of significance values for a given deconvolved image should follow the standard normal distribution. Significant detections appear as spikes in the positive tail of the distribution. A broadening of this distribution is caused by systematic effects unaccounted for in the standard analysis software. Therefore, the standard deviation of the distribution of significance values can be effectively used to characterize and quantify the quality of a given sky image and must be taken into account when calculating the true detection significance of a signal in that image.⁸ For this reason, we have weighted each sky image according to the variance of its significance distribution to produce sky maps in seven energy bands from 20 to 400 keV, namely, 20–30, 30–40, 40–56, 56–85, 85–120, 120–200, and 200–400 keV, and to construct the spectrum of the GC source IGR J17456–2901. We also performed the analysis of another energy band from 500 to 522 keV, which yielded upper limits compatible with the SPI detection of the electron-positron 511 keV annihilation line reported in Knödlseider et al. (2005) (see § 4). The mosaics were made using the *pixSpread* option in the OSA 4.2 imaging procedure, which, by projecting and distributing pixel values on the final mosaic pixel grid, preserves the symmetry of the point-

spread function (PSF) and allows the most accurate source positioning.

Since the central source is too weak to be fitted with the PSF in the imaging procedure performed on each pointing, the light curve was obtained by extracting the count rate at the source's pixel position from each reconstructed image.

3.2. Source Position Determination

The densely populated region around Sgr A* contains at least eight sources detected by ISGRI within 1° of the GN. Since the standard OSA pipeline does not perform simultaneous fitting of several sources, we have used a custom fitting procedure to determine the best-fit positions of the sources in the neighborhood of the GC. Subimages 40 pixels by 40 pixels in size centered on the radio position of Sgr A* were extracted from the mosaics in the different energy bands and fitted using a model that included up to eight point sources, each characterized by a two-dimensional Gaussian approximation of the system PSF and applied in the OSA software (Gros et al. 2003).

The width of the PSF was left as free global parameter (1 for all sources) because for mosaics, the width of the final PSF cannot be predicted. The presence of close sources and possible confusion does not influence the result since a very strong point-like source (1E 1740.7–2942) dominates the images and this parameter is basically determined by the fit of this source. The procedure gives us the possibility of fixing the position of some sources and also of setting a flat background level to be fitted together with the point sources. The residual map is inspected to verify that the fitting procedure is performed correctly.

Statistical errors at the 90% confidence level on the fitted positions were derived from the measured source signal-to-noise ratios using the empirical law determined through a systematic study of well-known sources (Gros et al. 2003). Although this empirical function of the source location accuracy in terms of the detection significance was determined using images reconstructed from single pointings, it was recently validated on mosaics as well. These tests were performed on isolated point sources, and since we are studying a region where the source density is unusually high, we present the results of our simultaneous fit for all the sources in the field to show that the offsets from the known positions are compatible with the empirical point-source location accuracy (PSLA).

3.3. Spectral Extraction

The standard ISGRI spectral extraction software works on the basis of a single pointing in the following manner. Using a list of sources, the procedure first calculates the pixel illumination factor: a model of the shadow of the mask cast on the detector plane by a given source. With this set of modeled shadowgrams, the software then attempts to fit the detector image by adjusting the relative intensity of each source either together with the background level simultaneously or by subtracting a background map normalized to the mean count rate beforehand. These procedures therefore estimate the maximum likelihood intensity of each source and in each pointing. However, a difficulty arises in the case of weak sources (\sim mcrab) that require very long exposure times to acquire sufficient statistics to be detected. In such cases, and in particular when a large number of sources have to be modeled, the most efficient way to derive a spectrum is to build and clean sky images in the desired energy bands and then to extract in each the intensity and its associated variance at the pixel that corresponds to the source position and to calculate the weighted mean count rate. As was described in the previous section, the

⁸ The method used to account for systematic effects on a per-ScW basis described here is equivalent to deriving a correction factor to the theoretical statistical uncertainty and applying it to each pixel in the variance map. It follows that any test statistic such as Pearson's χ^2 test, in which the variance of each data point is used to weigh the associated data value when testing for a deviation from the mean, should be used with the corrected variance values, i.e., the statistical variance multiplied by the variance of the distribution of significance values.

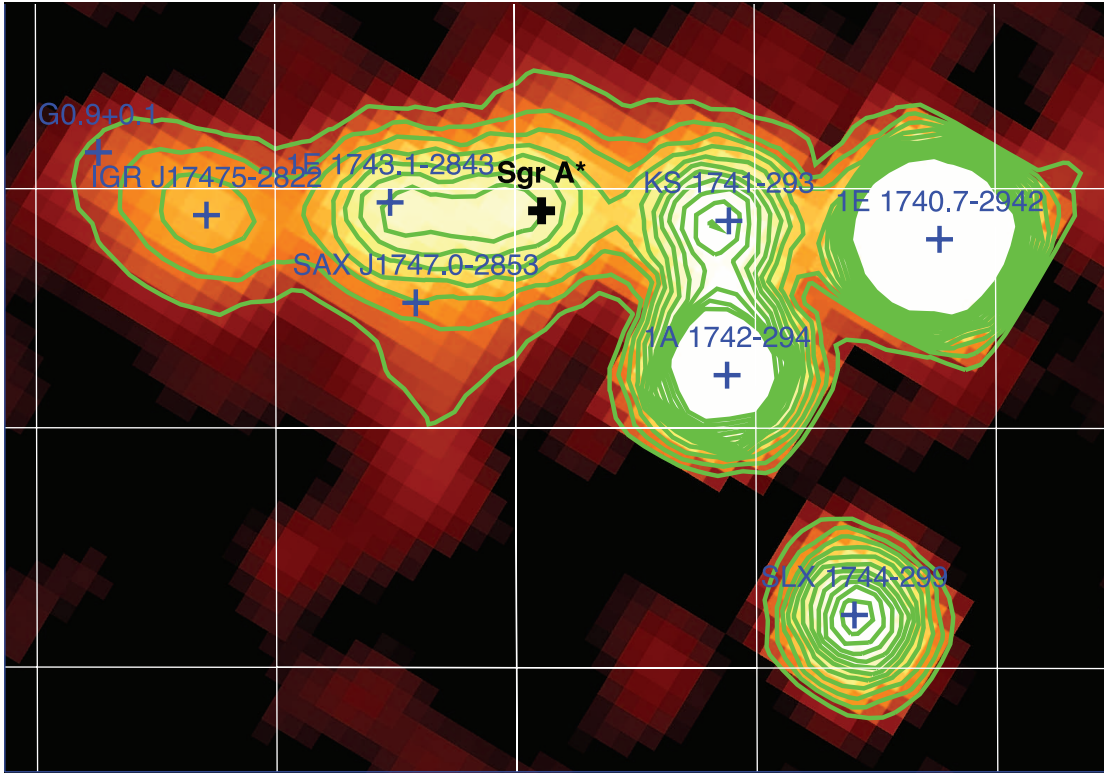


FIG. 1.—IBIS/ISGRI significance mosaic in the 20–40 keV energy range constructed from 2174 individual pointings with an effective exposure time at the position of Sgr A* of 4.7 Ms. Black indicates a statistical significance below or equal to 3σ , and white indicates a significance greater than or equal to 60σ . Contours mark isosignificance levels from 9.5 to 75 linearly. The orientation is in Galactic coordinates. The grid lines indicate Galactic coordinates with a spacing of 0.5° .

variance at a given pixel must be corrected to take into account the systematic effects that grow additively with exposure time. In the case of IGR J17456–2901, the flux and variance values were taken at the pixel that corresponds to the sky coordinates R.A. = $266^\circ 41' 68''$, decl. = $-29^\circ 00' 78''$ (J2000.0) in each sky map, the position of Sgr A*.

3.4. X-Ray Spectrum

The X-ray spectrum in the range 1–10 keV was extracted using 2004 *XMM-Newton* data from a circular region centered on the position of IGR J17456–2901 and with a radius of $8'$. This radius was chosen to match the PSF of the IBIS/ISGRI instrument, $13'$ FWHM, derived from the quadratic sum of the projected pixel ($5'$) and mask-element ($12'$) sizes (Gros et al. 2003).

For a spectral extraction in which a large portion of the camera's field of view is used as a collecting surface, it is most suitable to use *XMM-Newton* background event files compiled from high-latitude observations to construct a background spectrum. The procedure can be summarized as follows. EPIC pn, MOS1, and MOS2 event files are filtered to exclude all non-X-ray triggers using the event flag and pattern, after which a good time interval (GTI) selection is performed to exclude periods of solar flaring activity. The GTI selection criteria are based on the count rates in the high-energy bands, i.e., 10–12 keV for MOS1 and MOS2, and 12–14 keV for pn. An interval of 100 s qualifies as a GTI if it has less than 18 counts for both MOS cameras and 22 counts in the case of the pn camera. These strict selection criteria ensure that only the cleanest parts of the observation are used. The resulting filtered event files are used to make images in the high-energy bands in which a uniform distribution of events is expected under the assumption that energetic charged particles heavily dominate the instruments' respective spectra at

these energies and that these fall uniformly on the telescope. If no point sources are visible in these images, the ratios of the average count rate in the images to that of the background event file are used to scale the background spectra.

4. RESULTS

We now come to the results we have obtained on the morphology of the Galactic nuclear region and on IGR J17456–2901, which we tentatively associated with the supermassive black hole Sgr A* in Bélanger et al. (2004) and whose features we investigate more thoroughly in the present paper. We use three means of investigation to study the various characteristics of the source. The mosaic provides the fine positioning and general shape of the emission from the source and its close neighbors. The individual sky maps provide the elements needed for a variability study from kilosecond to month timescales, and the average spectrum of the source can be used to constrain the nature of the emission. Section 4.1 begins with a presentation of the results obtained from the mosaic in the range 20–40 keV on the morphology of the emission from the central degrees. This is followed by a discussion of the changes in the emission's morphology as a function of energy by looking at the mosaics in the different energy bands up to 85 keV, and ends with our results on the electron-positron annihilation line at 511 keV. In § 4.2 we discuss the light curves and variability of the central source on different timescales, and in § 4.3 we present the broadband high-energy spectrum of the central arcminutes of the Galaxy. Preliminary results on the GC with the X-ray monitor JEM-X are briefly discussed.

4.1. Mosaics and Spatial Characteristics

The mosaic shown in Figure 1 was constructed by summing 2174 sky images from individual pointings and amounts to an

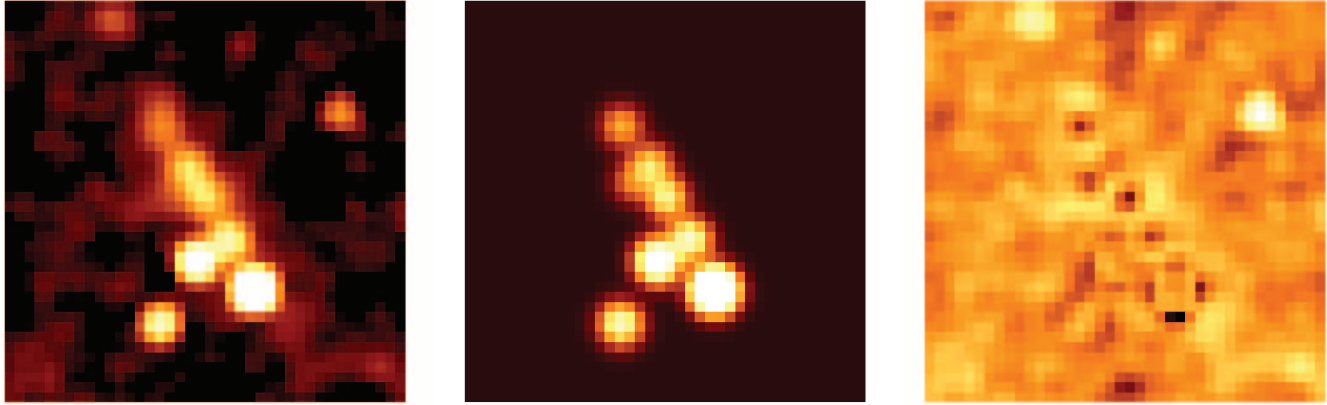


FIG. 2.—*Left*: Mosaic. *Middle*: Model constructed from simultaneous fitting procedure of the eight point sources labeled in Fig. 1. *Right*: Residuals after subtraction of model from mosaic. These maps are oriented in equatorial coordinates, where north is toward the top and east is toward the left.

effective exposure time of 4.7×10^6 s at the position of Sgr A*. This figure presents the highest S/N IBIS/ISGRI 20–40 keV image of the GC yet published, showing an excess of more than 45 in significance from the direction of Sgr A*.

To model the observed morphology, we have assumed that the emission is due to the sum of the known high-energy point sources of the region that have been detected by *INTEGRAL* at least once. The main sources are 1E 1740.7–2942, KS 1741–293, 1A 1742–294, SLX 1744–299/300, 1E 1743.1–2853, IGR J17456–2901, and SAX J1747.0–2853. The respective positions of these sources were derived from a simultaneous fit of all eight sources in the 20–40 keV mosaic. All positions were left as free parameters except for that of SAX J1747.0–2853, which was fixed. This source was quite active for the period referred to as 2004 spring and thus contributes to the emission near the GN, but since its global contribution is weak and it cannot be clearly resolved from 1E 1743.1–2853, we must fix its position.

The result of the fitting procedure is well illustrated in Figure 2, where we see the mosaic (*left*), the model (*middle*), and the residual map after subtraction of the model from the sky map (*right*). We can see that the spatial distribution of the modeled image resembles very closely that of the mosaic, even if the residues hint at the presence of a nonuniform underlying emission that is not properly taken into account in the tested model. The fitted source positions are listed in Table 2, where we also

report the S/N, the estimated error radius corresponding to the 90% confidence level, and the offset with respect to the proposed counterpart.

We find that the position of IGR J17456–2901, detected at an S/N level of 45 in this energy band, is R.A. = $17^{\text{h}}45^{\text{m}}42^{\text{s}}.5$, decl. = $-28^{\circ}59'28''$ (J2000.0) with an uncertainty of $0''.75$. The reliability of the derived position for this excess is supported by the fact that all the other sources in the field are very well positioned. The brightest source, 1E 1740.7–2942, is well within its associated error radius. For 1A 1742–294, the reported offset is very close to the value of the PSLA, while in the case of KS 1741–293 the best-known coordinate position itself has an uncertainty of about $1'$ (Sidoli et al. 1999). The source we labeled SLX 1744–299 is in fact a system composed of two known X-ray bursters located within $\sim 3'$ of each other (Skinner et al. 1990; Pavlinsky et al. 1994; Sakano et al. 2002), and for this reason we do not expect the fit to yield a position within the PSLA for either one of the two sources, independently of the detection significance. 1E 1743.1–2853, a well-known bright X-ray source (Porquet et al. 2003b), is almost certainly contributing to the high-energy emission in the region. However, performing the simultaneous fit using a single source to model the emission from the region around this source gives a centroid offset by about $2'$ from the *XMM-Newton* position known to arcsecond accuracy, a result that is not compatible with the expected error.

TABLE 2
POSITIONS OF *INTEGRAL* SOURCES IN THE GALACTIC NUCLEAR REGION

SOURCE ID	SIGNIFICANCE (σ)	FITTED POSITION		PSLA ^a (arcmin)	OFFSET ^b (arcmin)
		R.A. (deg)	Decl. (deg)		
1E 1740.7–2942.....	241.8	265.9794	–29.7430	0.28	0.14
1A 1742–294.....	98.6	266.5138	–29.5109	0.40	0.55
SLX 1744–299.....	61.8	266.8600	–30.0183	0.60	1.14
KS 1741–293.....	63.9	266.2130	–29.3327	0.59	1.23
1E 1743.1–2843.....	46.3	266.5782	–28.7378	0.74	0.54
Sgr A*.....	45.4	266.4285	–28.9918	0.75	1.13
IGR J17475–2822.....	18.9	266.8422	–28.4139	1.24	1.51
SAX J1747.0–2853.....	16.5	266.7500 ^c	–28.8700 ^c	1.45	0.0

^a Point-source location accuracy at 90% confidence level.

^b Distance between the fitted and nominal source positions.

^c Position was fixed in the fit.

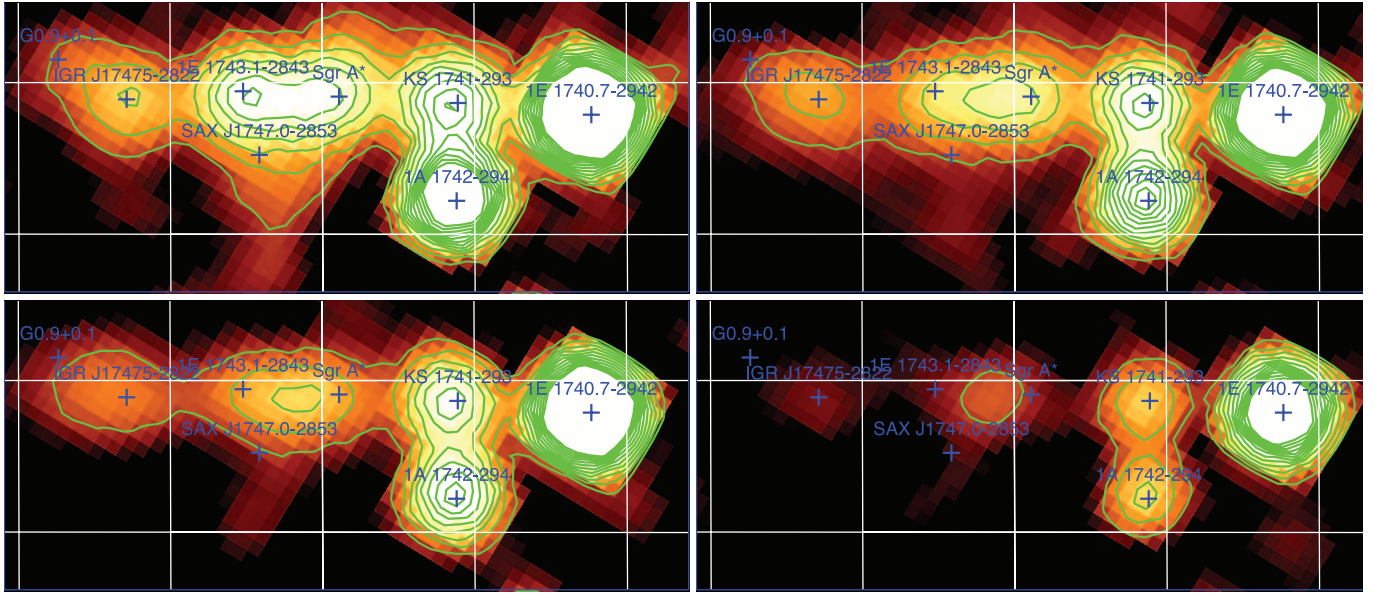


FIG. 3.—IBIS/ISGRI significance mosaic as in Fig. 1 in four energy bands: 20–30 keV (*top left*), 30–40 keV (*top right*), 40–56 keV (*bottom left*), and 56–85 keV (*bottom right*). Black corresponds to statistical significance below or equal to 3σ , and white to a significance greater than or equal to 50σ . The 12 contour levels mark isosignificance from 8 to 70σ linearly.

Since, as mentioned above, we know of one source detected by ISGRI that was active over the course of the first part of 2004, namely SAX J1747.0–2853, we included it and fixed its position. This yields a fitted position for 1E 1743.1–2853 that is well within the uncertainty derived from the source’s detection significance. The position of IGR J17475–2822 was compared to the center of the Sgr B2 complex and is discussed below.

IGR J17456–2901 is located at $1^{\circ}1'$ from the radio position of Sgr A* and $0^{\circ}9'$ from the center of Sgr A East. It is therefore compatible with either of these sources. Indeed, even if its associated positional uncertainty of $0^{\circ}75'$ is somewhat smaller than the offset, we expect this PSFA to be slightly overestimated when fitting multiple close sources (i.e., within the full width of the PSF). For example, in the case of the known source 1A 1742–294, the measured offset can be 20%–30% times larger than the PSFA. Moreover, we have found that the positions of 1E 1743.1–2853 and IGR J17456–2901 can change by $0^{\circ}3'$ – $0^{\circ}4'$ depending on the model adopted, and in some cases IGR J17456–2901 is positioned only $0^{\circ}6'$ from Sgr A*. For this reason we adopt a final error radius for the central source (and for 1E 1743.1–2853, which has a comparable S/N) of $1'$, about 30% larger than the PSFA value of $0^{\circ}75'$ derived from the relation given by Gros et al. (2003).

On the other hand, we can safely exclude a number of other candidates such as the transient *ASCA* source AX J1746.5–2901 (Sakano et al. 2002) mentioned by Revnivtsev et al. (2004) as a possible counterpart for the central excess based on the fact that it is located at a distance of more than $2'$ from it.

A similar analysis was performed on the mosaics from the same data set in different energy bands. As is clearly seen from the isosignificance contours in Figure 3, the morphology of the central degrees does not radically change with increasing energy. However, we notice that the emission that seems to bridge the sources labeled Sgr A* and 1E 1743.1–2843 at low energy persists at higher energies such that in the 56 to 85 keV range, the emission from the region seems to be centered between the two sources. This is a surprising result that we cannot readily interpret. An investigation of this based on a comparison of the emission

detected by IBIS/ISGRI with the 20 cm radio map, the 6.4 keV Fe line emission contours, and the CS map of the region raises several other interesting questions.

Figure 4 is a radio continuum map at 20 cm (Yusef-Zadeh et al. 2004) on which we have overlaid the 20–30 keV isosignificance ISGRI contours as they are shown in Figure 3 (*top left*). First, the centroid of the very bright Sgr A complex, which includes the luminous Sgr A East, appears to be in best agreement with the 20–30 keV ISGRI contours. For completeness, we performed a simultaneous fit using the position of Sgr A East instead of the one for Sgr A* and obtained very similar results. The offset of the fitted source is nonetheless slightly smaller for Sgr A East than for Sgr A*, but both are within the PSFA and thus statistically equivalent. We also see that the radio arc is quite distant from the peak near Sgr A* and can therefore be confidently excluded as a possible contributor to the flux at that position. However, the rough alignment of the radio arc with the elongation on the 20–30 keV contours in the direction of negative latitudes is intriguing. In the 56–85 keV contours (Fig. 3, *bottom right*) we see that the centroid of the emission is almost exactly between the Sgr A complex and the radio arc. This region is known to harbor large molecular clouds, and there appears to be a very good agreement between this high-energy emission feature and both the 6.4 keV Fe line emission, tracing irradiated molecular regions, and the CS map, tracing regions with high gas density. Furthermore, the centroid of this high-energy source is strikingly close to that of the unidentified EGRET source 3EG J1746–2851 and could in fact be its soft γ -ray counterpart. We extracted a spectrum for this source by fitting three sources, two of which had their positions fixed to those of Sgr A* and 1E 1743.1–2853, and obtained a power-law photon index of $\Gamma \sim 2.3$ and a luminosity of $L_X(20-120 \text{ keV}) \sim 2.6 \times 10^{35} \text{ ergs s}^{-1}$ for a distance of 8 kpc. A more detailed analysis of this source will be presented in future work.

Moving in the direction of positive longitudes, we clearly see an emission region depicted in the 20–30 keV contours and whose centroid is labeled as IGR J17475–2822, a source associated with Sgr B2 by Revnivtsev et al. (2004). Indeed, this source

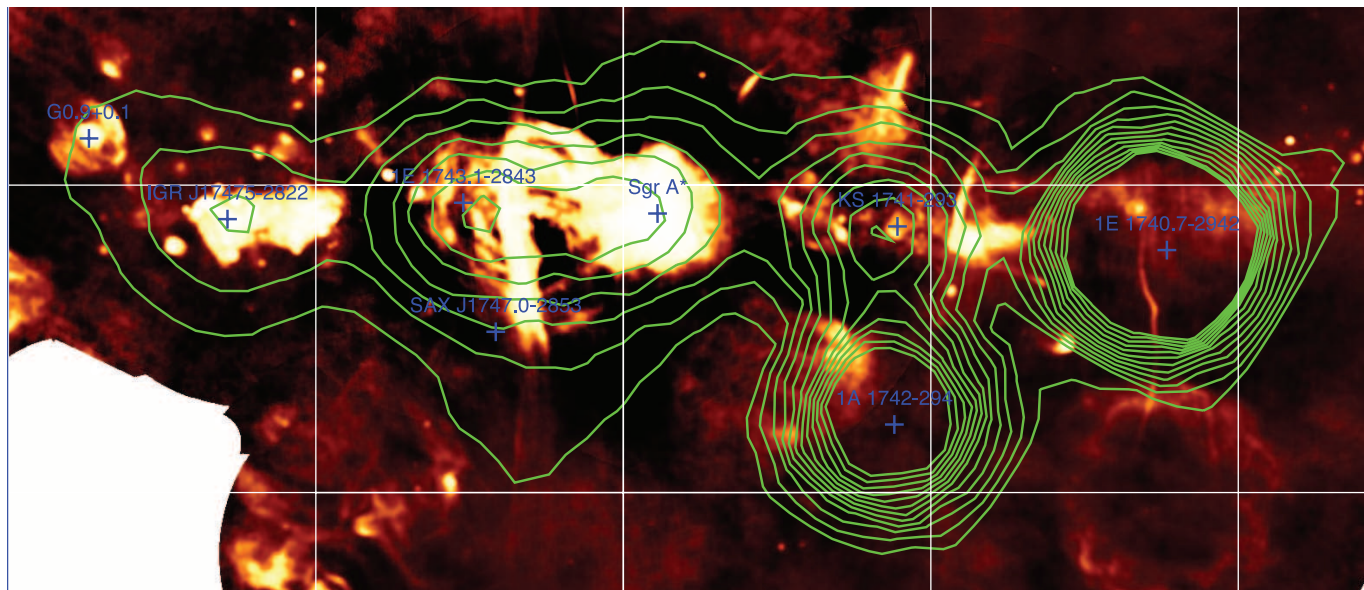


FIG. 4.—Radio map of the GC region at 20 cm with the 20–30 keV ISGRI contours overlaid.

coincides with the radio-bright Sgr B2 complex composed of molecular clouds and several compact H II regions. The fitted centroid for this source, taken to be pointlike in the 20–40 keV image, is positioned $1'.6$ from the estimated center of the cloud. As was pointed out by Revnivtsev et al. (2004), there is good agreement between the 6.4 keV Fe line contours and the emission detected by ISGRI as IGR J17475–2822. Moreover, the extension toward the north could tentatively be associated with the composite SNR G0.9+0.1 (Helfand & Becker 1987). The X-ray emission of its pulsar wind nebula (PWN) has been mapped with *XMM-Newton* (Porquet et al. 2003a), and the extrapolation of the flux toward 20 keV of about 9×10^{-5} photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ is consistent with the residual flux of roughly 0.06 counts s^{-1} (20–40 keV) or 8×10^{-5} photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. It is therefore tempting to interpret this as a detection of the very high energy synchrotron radiation from this source that was first detected this year by the HESS instrument (Aharonian et al. 2005a). It is worth noting that a long *XMM-Newton* exposure of this object has revealed the presence of a variable source probably of an accreting binary type, located at a distance of $1'$ (Sidoli et al. 2004). Having a luminosity close to that of G0.9+0.1, its contribution to the residual ISGRI emission could be significant.

We performed an analysis of the entire data subset used to construct the mosaics in the narrow band between 500 and 522 keV. This corresponds to the FWHM of the emission line in the ISGRI instrument (Terrier et al. 2003). A background map that corresponds to this energy range was used, and thus the resulting mosaic is free of systematic effects. No sources are detected in the field spanning 10° on either side of the GN both in longitude and latitude. We obtain a 3σ upper limit of 1.9×10^{-4} photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ to the flux from a point source at the position of Sgr A*, where the exposure and thus the sensitivity is maximal. This limit is calculated taking into account corrections derived from the probability of photoelectric interaction at 511 keV in the ISGRI detector (34%) and the fact that we have selected events using a band corresponding to 78% of line flux. SPI detected a 511 keV line flux of about 10^{-3} photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ with intrinsic line width of 2.7 keV (FWHM) from a region well described by a Gaussian with a FWHM of about 8° and that coincides ap-

proximately with the Galactic bulge (Knödlseider et al. 2005). If we assume that our sensitivity is more or less uniform over the central 10° around Sgr A*, our upper limit implies that if this emission is due to a collection of n point sources clustered together such that they cannot be resolved by SPI, then under the simplifying assumption that they all contribute equally to the total flux, each must have a flux of about $(1/n) \times 10^{-3}$ photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Therefore, at least five individual sources would be necessary to account for this extended 511 keV emission, in general agreement with the SPI result (Knödlseider et al. 2005).

Finally, JEM-X mosaics in four energy bands, with a total exposure of 3.2 Ms and effective exposure at the location of Sgr A* of about 500 ks, were constructed from 1204 science windows taken between 2003 February to 2004 October. We used the energy ranges 3–4, 4–8, 8–14, and 14–35 keV and find no evidence in this data sample for the presence of a JEM-X source in the Sgr A complex, except for a very marginal excess in the 8–14 keV mosaic. Although this analysis is preliminary and at this point somewhat qualitative, it is an interesting result in light of the strong ISGRI detection and obvious intense X-ray emission from this region seen by *XMM-Newton* and *Chandra*. It may be an additional indication that the emission is not due to a point source but rather to a compact diffuse emission region where thermal and nonthermal processes take place.

4.2. Light Curves and Variability Study

The complete light curve of IGR J17456–2901 in the 20–40 keV energy range, with a resolution of about 1800 s corresponding to the duration of a single pointing, is shown in Figure 5. Since low-amplitude variability on kilosecond timescales cannot be meaningfully studied for such a weak source due to statistical limitations, we have also done a search on longer timescales by rebinning the total light curve on the basis of 1 day, 2 weeks, and 1 month. These rebinned data sets are presented in Figure 6.

No individual point deviates from the mean by more than 3σ . The level of variability in the flux from the central source was evaluated by means of a simple χ^2 test. For the unbinned data set shown in Figure 5, the reduced χ^2 value is $\chi^2_\nu = 1.3$ (2758/2093). For the light curve with a 1 day time resolution (Fig. 6, top), we

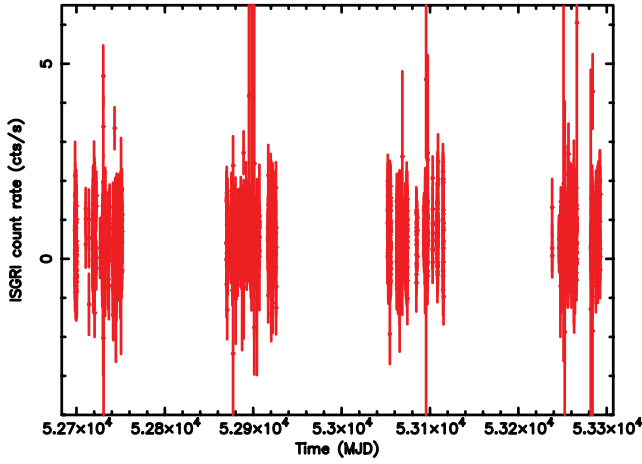


FIG. 5.—Light curve of IGR J17456–2901 in the 20–40 keV band constructed from 2174 sky images, each corresponding to one pointing (1800 s).

found $\chi^2_\nu = 1.7$ (180/109). In the case of the 2 week time resolution light curve (Fig. 6, *middle*), the reduced χ^2 value was found to be 3.6 (61/17). However, if we exclude the first point in this data set, which corresponds to the data collected during revolution 46, the first observation of the GC just after the initial calibration phase, we find a value of $\chi^2_\nu = 2.1$ (34/16), in closer agreement with the previous two. Finally, in the case of the 1 month time resolution light curve (Fig. 6, *bottom*), we find values of 5.2 (52/10) and 3.1 (28/9) if we exclude the first data point, heavily affected by the revolution 46 data given that there is a 3 week gap between this revolution and the second observation of the GC during revolution 53. These reduced χ^2 values tend to increase as the binning gets coarser, and thus we might be seeing a small level of variability on monthly timescales. Disregarding the data point associated with revolution 46, the only deviation that almost reaches 3σ from the mean is at the very end of the light curve. This lack of evidence of significant variations in flux other than the low level of variability seen on monthly timescales is in contradiction with the previous detection of a flare from IGR J17456–2901 (Bélanger et al. 2004) that we therefore do not confirm. We point out that those results were obtained with the preliminary analysis procedures and without

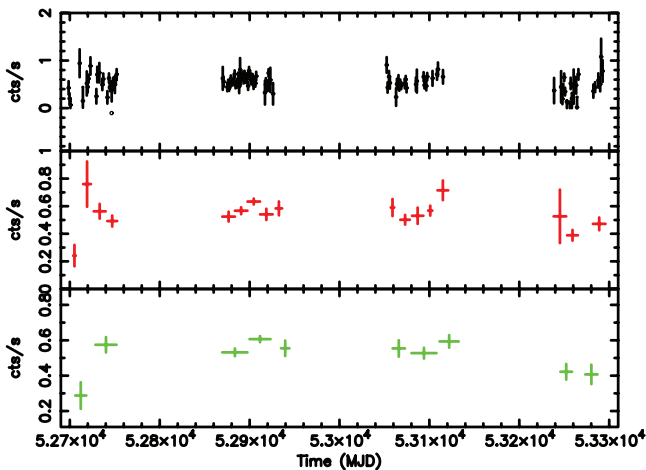


FIG. 6.—Rebinned light curves of IGR J17456–2901 constructed from the data set shown in Fig. 5 with time bins of 1 day (*top*), 2 weeks (*middle*), and 1 month (*bottom*).

background corrections. The data subset covering the observation period of the reported flare (2003 April) processed with the most recent analysis software and background correction maps do not indicate significant variability with respect to the mean count rate. Similarly, the sources 1E 1743.1–2843 and IGR J17475–2822 seem rather constant, unlike the four well-known X-ray binaries that show very large intensity variations over the 2 year observation period.

4.3. Spectrum of IGR J17456–2901

Figure 7 shows the ISGRI spectrum of the GC source that we modeled with a simple power law of index $\Gamma = 3.04 \pm 0.08$ ($\chi^2 = 7.92$ for 5 degrees of freedom and 3% systematics). The pegged power-law model `pegpwlw` in XSPEC uses the total flux as normalization, and in this way the photon index and normalization are independent parameters. The total flux in the range from 20 to 400 keV is $F_X(20\text{--}400 \text{ keV}) = (7.02 \pm 0.27) \times 10^{-11} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, which corresponds to a luminosity of $L_X(20\text{--}400 \text{ keV}) = (5.37 \pm 0.21) \times 10^{35} \text{ ergs s}^{-1}$ at a distance of 8 kpc to the GC. In the 20–100 keV range, the luminosity is $L_X(20\text{--}100 \text{ keV}) = (4.56 \pm 0.10) \times 10^{35} \text{ ergs s}^{-1}$, somewhat higher than our first estimate of $\sim 3 \times 10^{35} \text{ ergs s}^{-1}$ (Bélanger et al. 2004). This is not surprising given that the first estimate was based on a rough comparison with the Crab's count rate in only two energy bands, 20–40 and 40–100 keV, and that we now use six bands to constrain the slope. Moreover, the detection significance of the central source was much lower than in the present case.

Now turning to the broadband high-energy spectrum of IGR J17456–2901, we can see in Figure 8 the spectrum of the central source from 1 to 400 keV, where the X-ray portion (1–10 keV) is from *XMM-Newton* data collected during the multiwavelength campaign and therefore contemporaneous with part of the ISGRI data from 2004 used to construct the soft γ -ray portion (20–400 keV) of the spectrum that was discussed earlier and is shown by itself in Figure 7. The X-ray spectrum was made by extracting the photon flux from a region centered at the position of IGR J17456–2901 and with a radius of $8'$. This integration radius was chosen to be compatible with the IBIS/ISGRI PSF because there is no obvious X-ray point-source counterpart to IGR J17456–2901 within $1'$ of Sgr A*. Such a point source would have to be hard, persistent, and extremely bright in X-rays in

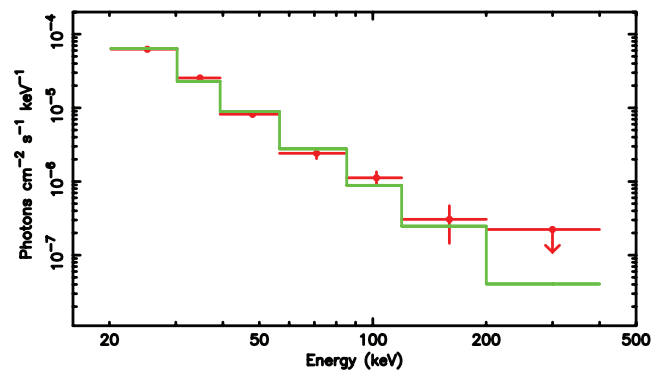


FIG. 7.—Two-year averaged ISGRI spectrum of the GC source IGR J17456–2901 in the range 20–400 keV. The spectrum is fit with a power law normalized over the whole energy range and yields a photon index of $\Gamma = 3.04 \pm 0.08$. Total flux is $(7.02 \pm 0.27) \times 10^{-11} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The last point in the spectrum corresponding to the range 200–400 keV is given as the 1σ upper limit, and the data point in the 120–200 keV band has a significance of $\sim 2\sigma$.

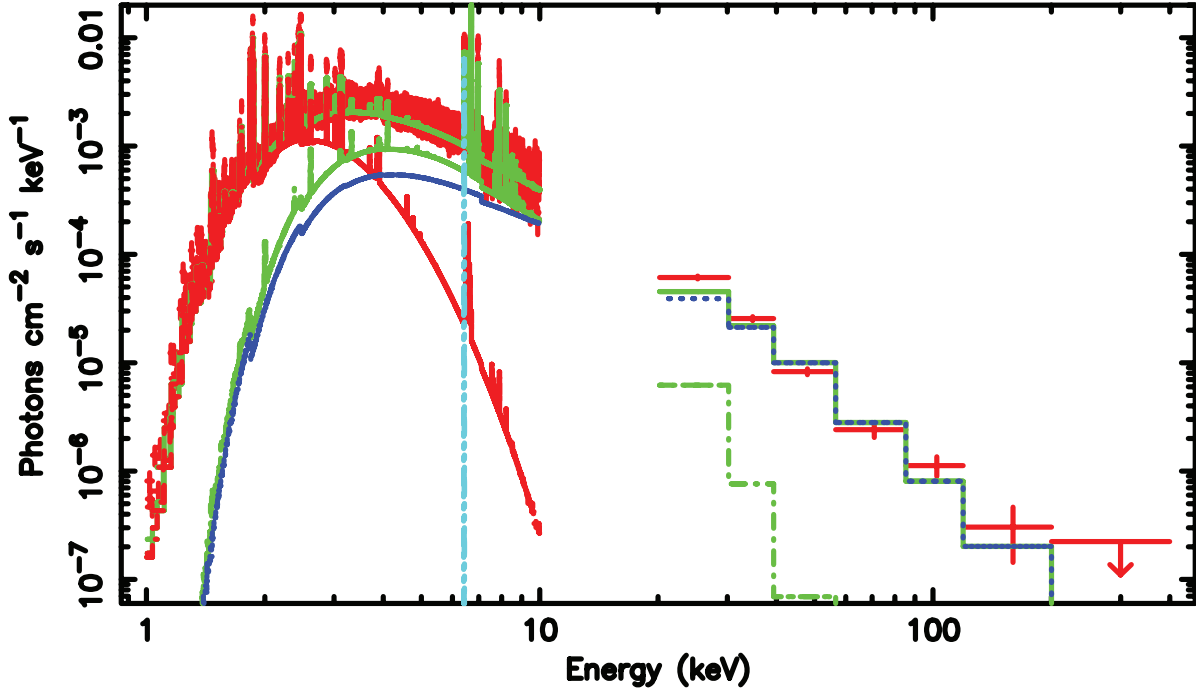


FIG. 8.—Broadband high-energy spectrum of IGR J17456–2901 constructed from *XMM-Newton* data in the 1–10 keV energy range and from ISGRI data from 20 to 400 keV. The X-ray portion of the spectrum was built by integrating over a circular region of radius $8'$. The model used is an absorbed two-temperature plasma plus a broken power law, where the low- and high-temperature components are drawn in red and green, respectively, the power law is in dark blue, and the 6.4 keV Gaussian line is in light blue. As in Fig. 7, the point in the last bin gives the 1σ upper limit on the flux in the 200–400 keV range.

order to be compatible with the high-energy flux of the *INTEGRAL* GC source.

The model fitting for large extended regions near the GC is challenging for two main reasons. First, the X-ray spectra of such extended regions give a coarse, averaged spectral behavior of a complex field heavily dominated by diffuse emission that we know to have several different spectral components (Muno et al. 2004a) but that also includes all the point sources, some of which surely contribute to the hard X-ray flux. Of course, this difficulty dissipates as integration radius decreases since fewer components are summed together. Second, we have no a priori knowledge of the nature of the emission detected as IGR J17456–2901 and therefore do not know whether the comparison with the total X-ray spectrum from a region that roughly corresponds to ISGRI's angular resolution is an appropriate one. Keeping these caveats in mind, we justify this type of comparison by pointing to the fact that the source coincident with the GN, detected by *INTEGRAL* as what appears to be a point source, must undoubtedly contribute to the X-ray spectrum from the region that corresponds to its spatial extent. The spectral transition from 10 to 20 keV must be more or less continuous, and therefore we expect the high-energy component present in the X-ray spectrum and from which IGR J17456–2901 arises to stand out beyond the thermally dominated spectrum at around 20 keV. Therefore, a large χ^2 value should not be surprising, for it points to the fact that the emission in the range from 1 to 3 keV is not modeled properly for the reason mentioned above. Our aim in this section is to constrain the high-energy characteristics of this source in the range 1–400 keV using the ISGRI spectrum above 20 keV.

The broadband spectrum can be modeled using a simple broken power law over the entire range to get an idea of the change of spectral index with increasing energy. However, in order to be as constraining as possible without overlooking possibly important components to this emission such as the hot-temperature plasma present in the GC region, we performed the fit with the same

model as the one used by Muno et al. (2004a) to fit the diffuse emission from the various regions in the $17' \times 17'$ field around Sgr A* referred to as the southeast, southwest, northwest, east, close, and northeast regions by the authors. This model comprises a two-temperature plasma with different absorption columns, a power law, and a Gaussian line to fit the 6.4 keV neutral Fe emission line absorbed with the same column density. Although providing a reasonable fit to the data from 2–8 keV, the model does not work well in the ISGRI range of the spectrum. The power-law fit with index $\Gamma \approx 2$ underestimates the flux in the 20–40 keV range and overestimates it above 85 keV. A somewhat better fit is provided by replacing the simple power law with either a cutoff or broken power law. In the case of the cutoff power law, we found a photon index of $\Gamma \approx 1$ and cutoff energy of about 25 keV, and in the case of the broken power law, the photon indices were found to be $\Gamma_1 \approx 1.5$ and $\Gamma_2 \approx 3.2$ with a

TABLE 3
SPECTRAL MODEL OF THE GALACTIC CENTER SOURCE IGR J17456–2901

Quantity	Cutoff Power Law	Broken Power Law
$N_{H,1}$ (10^{22} cm $^{-2}$).....	$7.81^{+0.02}_{-0.04}$	$7.79^{+0.11}_{-0.13}$
kT_1 (keV).....	$1.002^{+0.008}_{-0.004}$	$0.99^{+0.02}_{-0.02}$
N_{kT_1}	$0.378^{+0.009}_{-0.006}$	$0.38^{+0.02}_{-0.02}$
$N_{H,2}$ (10^{22} cm $^{-2}$).....	$13.13^{+0.17}_{-0.23}$	$13.52^{+0.56}_{-0.50}$
kT_2 (keV).....	$6.56^{+0.07}_{-0.09}$	$6.60^{+0.13}_{-0.12}$
N_{kT_2} (10^{-2}).....	$6.35^{+0.05}_{-0.06}$	$6.45^{+0.01}_{-0.02}$
Γ_1	$1.09^{+0.03}_{-0.05}$	$1.51^{+0.06}_{-0.09}$
$E_{\text{cutoff/break}}$ (keV).....	$24.38^{+0.55}_{-0.76}$	$27.13^{+2.79}_{-4.39}$
Γ_2$.....	...	3.22^{+0.34}_{-0.30}$
N_{Γ} (10^{-3} photons cm $^{-2}$ s $^{-1}$ keV $^{-1}$).....	$4.46^{+0.29}_{-0.27}$	$7.445^{+0.001}_{-0.001}$
χ^2 (dof).....	4490.7 (2658)	4458.0 (2657)

NOTE.—Uncertainties on the parameters correspond to the 90% confidence level.

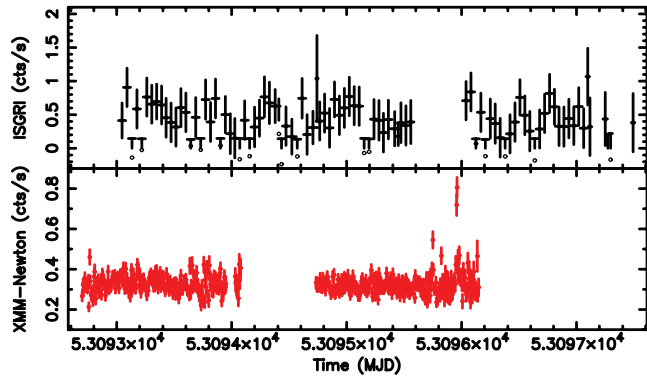


FIG. 9.—*XMM-Newton* light curve of the region within $10''$ of Sgr A* in the 2–10 keV range with a time resolution of 500 s (*bottom*) and ISGRI light curve of IGR J17456–2901 in the range 20–30 keV with a time resolution of about 1800 s (*top*) for epoch 1 of the multiwavelength campaign. The data gaps correspond to the times between orbits, for which there are no scientific data.

break energy of about 27 keV. The best-fit parameter values are given in Table 3, where only the free parameters are listed; all abundances are fixed to solar abundance.

Looking closely at the unfolded spectra shown in Figure 8, we can distinguish the low- and high-temperature plasma components drawn in red and green, respectively, the Gaussian line in light blue, and the broken power law in dark blue. The hot thermal component clearly dominates the spectrum at low energies, but its contribution is already well below that of the power-law component in the 20–30 keV band and is totally negligible beyond that. If we fix the temperature of the hot component at 8 keV, the effect on the other parameters is small. The photon index in the cutoff power law decreases from 1.09 to 1.05, and the high-energy cutoff increases from 24.4 to 27.7 keV. The χ^2 value increases to 4849.0 for one more degree of freedom, and therefore the reduced χ^2 is slightly larger, i.e., $\chi^2_\nu = 1.82$, and the contribution of this component to the overall flux in the 20–30 and 30–40 keV bands increases by a factor of 2 but still lies 3 times below the power law in the first band and a factor of 7 below in the second.

4.4. Multiwavelength Campaign

A multiwavelength campaign to study Sgr A* with a total exposure time of about 500 ks was performed in two segments, the first of which was from 2004 March 28 to April 1 and that we refer to as epoch 1, and the second from 2004 August 31 to September 3, referred to as epoch 2. The primary aim of this campaign was to study correlated variability, particularly in the IR, X-ray, and soft γ -ray energy bands. Figures 9 and 10 show the 2–10 keV *XMM-Newton* light curve of a $10''$ region around Sgr A* in the bottom panels and the 20–30 keV ISGRI light curve of IGR J17456–2901 in the top panels for epochs 1 and 2, respectively. As is clearly visible, the periods during which the factor-40 flares from the direction of Sgr A* occurred do not have simultaneous coverage in the *INTEGRAL* data. Unfortunately, both data gaps in the ISGRI light curve correspond to the period between orbits. For this reason we are still unable to conclude whether or not we can expect to detect a correlated variability in the X-ray and soft γ -ray bands. There are two features worth mentioning that can be noticed in Figure 10, although they have marginal statistical significance. First, two points in the ISGRI light curve, approximately in the middle of the top panel, stand out at about 2.5σ above the mean. These are temporally

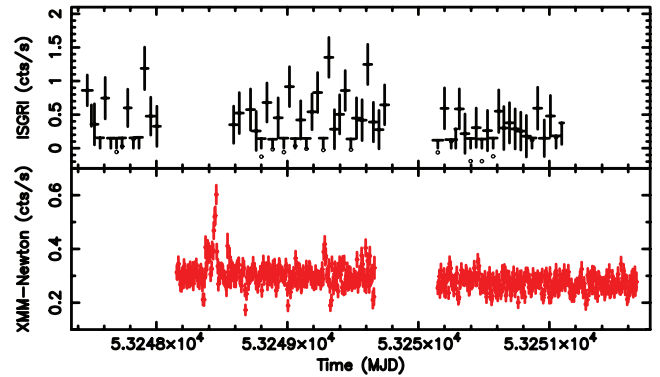


FIG. 10.—Same as in Fig. 9, but for observation epoch 2. The clear periodic dips in the *XMM-Newton* light curve are caused by the eclipses of the transient CXOGC J174540.0–290031 (Porquet et al. 2005b; Munro et al. 2005b).

coincident with the two hiccups at the end of the first data subset in the X-ray light curve shown in the bottom panel. Second, the weighted mean X-ray count rate is somewhat higher in the first data subset (0.30 ± 0.001 counts s^{-1}) than in the second (0.27 ± 0.001 counts s^{-1}), a behavior apparently seen also in the two corresponding segments of the ISGRI light curve, where the weighted mean count rate is 0.42 ± 0.03 counts s^{-1} in the first and 0.20 ± 0.07 counts s^{-1} in the second. This indicates that there may be a relationship between the flaring activity of Sgr A* and emission at higher energies. Future simultaneous observations will undoubtedly help elucidate this point, which remains uncertain.

5. SUMMARY AND DISCUSSION

5.1. Summary

We have studied the morphology of the high-energy emission from the central few degrees of the Galaxy in the energy range from 20 to 400 keV based on a sample of *INTEGRAL* data collected from 2003 February to 2004 October with a total live time of 7×10^6 s. We paid particular attention to the characteristics of the emission from the Galactic nuclear region, where we detect a source with high significance in the 20–40 keV energy range located at R.A. = $17^h45^m42^s.5$, decl. = $-28^\circ59'28''$ (J2000.0) with an uncertainty of $1'$ and therefore compatible with the position of the central black hole Sgr A*. This detection confirms the results obtained by Bélanger et al. (2004) on the GC source IGR J17456–2901.

The source IGR J17456–2901 is persistent and shows no variability at the 3σ level, in contradiction with what was suggested in Bélanger et al. (2004). This result holds at kilosecond, daily, biweekly, and monthly timescales.

The spectrum of the central source in the 20–400 keV range is well fit by a power law of index $\Gamma \approx 3$. We have combined this data set with the X-ray spectrum of a circular region with radius of $8'$ centered on the *INTEGRAL* GC source derived from partially contemporaneous *XMM-Newton* data collected during observations of the GC performed in 2004 in the range 1–10 keV. From this we find that the broadband high-energy spectrum can be fit equally well with a model that comprises a two-temperature plasma ($kT_1 \approx 1.0$, $kT_2 \approx 6.5$), a Gaussian line to account for the neutral Fe emission at 6.4 keV, and either a cutoff power law with photon index $\Gamma \approx 1$ and cutoff energy of about 25 keV or a broken power law with photon indices of $\Gamma_1 \approx 1.5$ and $\Gamma_2 \approx 3.2$ and break energy of around 27 keV.

We also detect hard ($\Gamma \sim 2.2$) emission from a region located between Sgr A* and the radio arc that seems to coincide with the 6.4 keV emission from neutral to weakly ionized Fe and with the CS map of the region. As is the case with IGR 17475–2822, we believe that this new detection of hard X-ray emission originates in one or several large molecular clouds known to exist in that region.

The nature of the emission from the direction of the Sgr A complex detected as IGR J17456–2901 is unknown. In what follows we discuss a number of scenarios in an attempt to identify the source of the emission detected by *INTEGRAL* and apparently centered on Sgr A*.

5.2. Hot Plasma

The hot component at 6–8 keV of the two-temperature plasma at the GC is well known, and its presence is viewed by many as problematic in terms of its being confined given the escape velocity of a hydrogen plasma at that temperature, or in terms of the heating mechanisms that would be required to supply energy to the plasma were it not confined. It is interesting to ask what is this hot plasma's extrapolated flux at energies between 20 and 30 keV in order to assess its possible contribution to the flux detected from the central arcminutes. In § 4.3 we showed that although the hot plasma component totally dominates the spectrum in the range from 2 to 5 keV, its contribution to the overall flux is several times less than that of the power law in the 20–30 keV range and drops to a negligible level with respect to the power-law component in the range 30–40 keV. These estimates are based on the best-fit value for the temperature of 6.5 keV, and clearly the contribution increases somewhat if we fix the temperature at 8 keV. Nonetheless, this hot plasma can only provide a very small fraction of the emission detected from the direction of the GN by *INTEGRAL*, and this solely in the first band, from 20 to 30 keV.

5.3. X-Ray Transient Sources

A large number of X-ray transients have been detected in the neighborhood of Sgr A* in the last few years (Muno et al. 2004b; Porquet et al. 2005a). In fact, there even appears to be an overabundance of such sources near the GC, where four X-ray binaries lie within 1 pc (25'') of Sgr A* (Muno et al. 2005a). These sources, observed at luminosities between 10^{33} and 10^{36} ergs s⁻¹ in the 2–10 keV range, are not particularly bright since these luminosities are intermediate between quiescence and outburst. In the paragraphs that follow we attempt to estimate the effect of such sources on the flux of IGR J17456–2901 in the 20–120 keV range. We restrict ourselves to this energy range because it is here that we have the best estimate of flux from the ISGRI data.

The GC source IGR J17456–2901 shows very little variability, and hence its persistent quality demonstrates that it is probably not heavily influenced by the sometimes radical brightening of an individual X-ray transient as it moves from quiescence to outburst. Furthermore, the high detection significance in the 20–40 keV band permits an accurate determination of the emission centroid and yields an uncertainty of about 1'. For this reason, we do not consider transients that lie outside the error radius of IGR J17456–2901 but turn our investigation to the four transients detected by *Chandra* within 30'' of the central black hole (Muno et al. 2005a) and pay particular attention to the remarkable low-mass X-ray binary (LMXB) located just 3'' south of Sgr A* (Muno et al. 2005b). This transient, CXOGC J174540.0–290031, was very bright during both epochs of the multiwavelength campaign, the only period for which we have contemporaneous

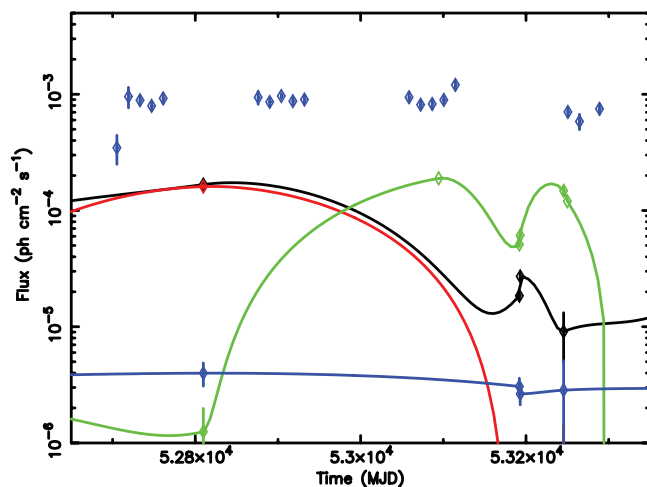


FIG. 11.—Light curves in the 2–8 keV energy range of CXOGC J174535.5–290124 (black), CXOGC J174540.0–290005 (red), CXOGC J174540.0–290031 (green), and CXOGC J174538.0–290022 (blue) and in the 20–40 keV range for IGR J17456–2901 binned in 2 week periods.

X-ray and *INTEGRAL* data, and will therefore be the main focus of the discussion.

The four transients detected within 30'' of Sgr A* are also the hardest of the seven transients discussed by Muno et al. (2005a). These are CXOGC J174535.5–290124, CXOGC J174538.0–290022, CXOGC J174540.0–290005, and CXOGC J174540.0–290031. Using the available *Chandra* data for these (and *XMM-Newton* for CXOGC J174540.0–290031), we constructed their respective light curves in the range 2–8 keV and rebinned to make the long-term trends more apparent (the *Chandra* results were published in Muno et al. 2005a). We plotted the light curve for IGR J17456–2901 rebinned in 2 week segments on the same time line. The 20–40 keV range is used because it has the highest S/N. Figure 11 shows these light curves, where that of IGR J17456–2901 appears as the topmost one. The flux is in units of photons cm⁻² s⁻¹, and the time unit is the Modified Julian Date.

The observation cycles are clearly depicted by the ISGRI light curve, where each data subset corresponds to a season, the first one being 2003 spring and the last one being 2004 fall. As was found in § 4.2, there is no clear sign of variability in the *INTEGRAL* light curve other than the close to 3 σ deviation in the very last part of the light curve. Furthermore, it is difficult to draw conclusions from the general comparison with the flux levels of the four hardest *Chandra* transients shown in Figure 11. We will now take a closer look at the unusual transient CXOGC J174540.0–290031.

This source was discovered during the 2004 July *Chandra* observations of the GC (Muno et al. 2005b) and was also seen to be active throughout both epochs of the multiwavelength campaign of 2004, reaching its peak X-ray brightness in April. A very clear periodic signal was detected from this source during epoch 2, and the orbital period was determined to be about 8 hr (Porquet et al. 2005b; Muno et al. 2005a; Bélangier et al. 2005). This source, located remarkably close to the supermassive black hole at only $\sim 3''$ from the radio position of Sgr A*, was observed in radio during the campaign (Bower et al. 2005) and seen to produce a jet with a luminosity of $L_{\text{jet}} \sim 10^{37}$ ergs s⁻¹.

In order to estimate the possible contribution of this source to the *INTEGRAL* flux, we used the spectral parameters derived from the contemporaneous *XMM-Newton* observations and presented in Porquet et al. (2005b). Taking a photon index of $\Gamma = 1.6$

and a 2–10 keV flux normalization of 1.3×10^{-12} ergs $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, we find that the extrapolated 20–120 keV luminosity is about 5×10^{34} ergs s^{-1} . For an index of $\Gamma = 1.98$ and a flux of $F_X = 1.8 \times 10^{-12}$ ergs $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, we get an extrapolated luminosity of 2.5×10^{34} ergs s^{-1} . The largest of these values amounts to about 1/10 of the derived luminosity of IGR J17456–2901 and is probably still overestimated given that the spectrum of a LMXB in outburst is rarely a pure power law above energies of ~ 100 keV. A more realistic description would be a Comptonization model where the seed photons are boosted to higher energies as they encounter fast thermal electrons in the hot (30–50 keV) corona. In this case, the contribution in the ISGRI band would very likely be even less than the above extrapolations. According to this simple estimate, 10 sources similar to CXOGC J174540.0–290031 in luminosity and spectral index within a few arcminutes of Sgr A* would have to be active more or less continuously to account for the 20–120 luminosity of IGR J17456–2901. Of course, the flux could be due to a substantially larger number of dim and hard sources that have until now evaded detection by *Chandra* and *XMM-Newton* and that are clustered around Sgr A*. Only the next generation of X-ray observatories, with a sensitivity substantially higher than the current instruments, will bring an answer to this question.

We have considered and tried to quantify the effect of the known X-ray transients located within $30''$ of Sgr A* on the ISGRI count rate. We find that the flux of IGR J17456–2901 cannot be explained by the contribution of transients located very close to the central black hole and that their contribution appears to be negligible over the range from 20 to 120 keV.

5.4. Flares from Sgr A*

Our campaign to search for correlated variability in the X-ray and soft γ -ray flux from the central black hole was inconclusive due to *INTEGRAL* data gaps during the Sgr A* flares. Of the two factor-40 flares that occurred on 2004 March 31 and August 31, the first was somewhat harder with a photon index of $\Gamma \approx 1.5$ compared to $\Gamma \approx 1.9$ for the second flare (Bélanger et al. 2005). By extrapolating the flux of the hardest flare to the 20–30 keV energy band, we find that its contribution to the ISGRI count rate using an average effective area in this band of 650 cm^2 should be about 0.05 counts s^{-1} . Taking a peak flare flux equivalent to twice the average gives 0.1 counts s^{-1} , and so since IGR J17456–2901's observed ISGRI count rate in this range is around 0.4 counts s^{-1} , we would expect a rise of $\sim 25\%$ due to the flare. Based on these simple assumptions, this type of event would therefore not be detectable by ISGRI and for the same reason cannot explain the emission seen as IGR J17456–2901.

Furthermore, the derived luminosity of the GC source of around 5×10^{35} ergs s^{-1} cannot result directly from the integration of successive flares from the central black hole. The flares occur on average once per day and have typical luminosities of 10^{35} ergs s^{-1} for durations of a few thousand seconds. If the flares last 3 to 20 ks, even if they all reached peak luminosities of around 10^{36} ergs s^{-1} , this would still not be enough to make up the persistent luminosity of IGR J17456–2901. This is not to say that the acceleration of particles to very high Lorentz factors during such a flare could not lead to a secondary high-energy emission that would not be detected by X-ray instruments but that would contribute to the flux in the range 20–400 keV.

5.5. Charged-Particle Acceleration

The detection of a persistent source up to about 120 keV compatible with the position of the central black hole raises the

very interesting possibility that it may be related to the TeV source detected in the same region by HESS (Aharonian et al. 2004). These observations lend crucial support to the idea that acceleration of particles to very high energies is taking place at the GC (Crocker et al. 2005). Furthermore, all of them agree on the apparent absence of variability from the central source.

The HESS collaboration has been particularly successful at determining the high-energy properties of this source detected over two epochs, 2003 June–July and 2003 July–August, and together with the earlier 30 MeV to 10 GeV EGRET detection of the continuum source 3EG J1746–2851 within 1° of the nucleus (Mayer-Hasselwander et al. 1998), this TeV detection provides some evidence of hadronic acceleration at the GC, either by Sgr A* itself, within the shocked shell of an SNR such as Sgr A East, or by some other mechanism, including the interaction of non-thermal filaments with dense molecular environments. Protons could be accelerated, either via first-order Fermi acceleration at a shock or via stochastic acceleration (a second-order Fermi process) in a turbulent magnetic field, and then scatter with ambient protons to produce pions. The neutral pions subsequently decay into two γ -rays, whereas the positive and negative pions initiate a muon, electron, positron and neutrino cascade. Some evidence for a pion origin of the γ -rays is provided directly by the EGRET spectrum, which exhibits a clear break at ~ 1 GeV and therefore cannot be fit by a single power law. Instead, this break is usually attributed to the rest-frame energy of pion-decay photons. The secondary electrons and positrons produced by the charged pions in concert with the π^0 -decay photons are capable of producing their own γ -ray emission via bremsstrahlung and Compton scattering. For example, if these leptons build up to a steady-state distribution balanced by bremsstrahlung and Coulomb losses, they naturally account for the lowest energy EGRET datum. This is rather important because the pion decays link the lepton and photon generation rates, so the bremsstrahlung and pion-decay photon emissivities are tightly correlated.

The possibility that the relativistic protons may be accelerated close to Sgr A* was first explored by Markoff et al. (1997, 1999), who concluded that the maximum attainable energy is on the order of 4×10^5 TeV. However, there appear to be two principal reasons why the p - p scatterings that lead to pionic γ -ray emission probably do not occur in the acceleration zone itself. First, the ensuing particle cascade would produce a copious supply of energetic leptons that, in the presence of the inferred ~ 1 – 10 G magnetic field for this source, would greatly exceed Sgr A*'s observed radio flux. Second, the lack of variability in the data from keV to TeV energies argues against a compact point source such as Sgr A*. The more recent analysis of proton acceleration within Sgr A* (Liu et al. 2004, 2005) has shown that these relativistic particles actually diffuse to distances ~ 2 – 3 pc away from the acceleration site before scattering with the ambient protons, and therefore that the ensuing leptonic cascade does not overproduce emission at longer wavelengths having left the region where the magnetic fields are very strong. Aharonian & Neronov (2005b) considered several possible mechanisms for photoproduction due to energetic protons near the source itself and confirmed that the emission region would need to be far from the acceleration site. In support of this picture, wherein the relativistic particles responsible for the HESS and *INTEGRAL* source are accelerated near Sgr A*, it is worth noting that the mechanism responsible for accelerating the electrons required to account for Sgr A*'s 7 mm emissivity also accelerates protons in the system. These protons do not radiate as efficiently as electrons and therefore diffuse away from the acceleration site. The electron acceleration rate implied by the radio measurements also corresponds to the right \sim TeV luminosity

from the protons flooding the region surrounding the black hole to match the HESS measurements. In addition, the time required for these particles to diffuse outward is $\sim 10^5$ – 10^6 yr, which would argue against any rapid variability in the TeV γ -ray emission, as observed. Thus, although both the HESS and *INTEGRAL* GC sources appear to be slightly extended, the origin of the particles responsible for the broadband spectrum of the nuclear region may ultimately still be Sgr A*.

5.6. Sgr A East

The supernova remnant Sgr A East, whose centroid is located $50''$ from Sgr A*, is another likely source of γ -rays near the GN (see Melia & Falcke 2001). It is a member of a class of remnants detected at 1720 MHz (the transition of OH maser emission), a signature of shocks produced at the interface between supersonic outflow and the dense molecular cloud environments with which they interact. It has already been shown (Fatuzzo & Melia 2003) that Sgr A East is capable of producing the observed γ -ray luminosity detected by EGRET once the unusually high ambient particle density ($>10^3 \text{ cm}^{-3}$) and strong magnetic field (>0.1 – 0.2 mG) are taken into account. In a thorough examination of the particle acceleration and energetics in this source, Crocker et al. (2005) demonstrated that Sgr A East could very well also be the source of the TeV spectrum measured by HESS. One should note, however, that the EGRET and HESS sources are probably not coincident. The centroid of the EGRET emission (Mayer-Hasselwander et al. 1998) appears to be significantly displaced away from Sgr A*, whereas the TeV source lies within $\sim 1'$. In addition, although the EGRET and HESS spectral indices are similar (~ 2.2), the corresponding fluxes at GeV and TeV energies differ by over an order of magnitude. It appears that the EGRET source must cut off well below the TeV range, suggesting, together with the relative spatial displacement of the two sources, that we must be dealing with at least two separate regions of γ -ray emissivity.

Sgr A East may in fact be a very good candidate for the source of the emission detected by *INTEGRAL* and HESS at the GC. This composite SNR in its radiative phase has several observational characteristics akin to supernovae in molecular clouds or dense environments: a bright radio shell with a strong nonthermal synchrotron component, X-ray emission from the compact central core dominated by the hot thermal plasma component, and a strong He-like 6.7 keV Fe emission line. It shares some of these features with G0.9+0.1, which was recently confirmed as a source of TeV radiation by the HESS collaboration (Aharonian et al. 2005a), and its local environment makes it a good candidate for powerful particle acceleration. There is one important distinction between G0.9+0.1 and Sgr A East, however: the compact core of G0.9+0.1 is known to be a PWN, the central pulsar of which has been detected (Gaensler et al. 2001) and that has a hard, nonthermal X-ray emission. The X-ray core of Sgr A East is so highly dominated by thermal emission that nonthermal X-ray emission does not even seem to be present. We know, however, that such behavior is not unexpected for SNRs in mo-

lecular clouds or dense environments (Bykov 2002). Moreover, there is preliminary evidence that several of the new HESS sources detected during the Galactic plane scan might be SNRs with weak X-ray emission (Aharonian et al. 2005b).

5.7. Final Comments

The ISGRI instrument on the *INTEGRAL* satellite has detected with a high significance hard X-ray and soft γ -ray emission centered within $1'$ of the GN. We have analyzed 2 years of *INTEGRAL* observations and thoroughly examined this data over the energy range from 20 to 400 keV. Combining these results with *XMM-Newton* data in the energy range from 1 to 10 keV, we have found that this emission cannot be attributed to the hot thermal plasma in the Sagittarius complex, that it cannot be explained by the integrated flux from known X-ray transients near the central black hole, and that it cannot be the simple extrapolation of the X-ray flux of flares from Sgr A*. The fact that IGR J17456–2901 is comparable in brightness to the well-known binary system 1E 1743.1–2853 in the 20–40 keV range, but that unlike this source it does not produce the large X-ray flux that makes 1E 1743.1–2853 so incredibly conspicuous in the soft X-ray band, suggests that IGR J17456–2901 is not pointlike. In addition, the fact that JEM-X, with its $\sim 3'$ angular resolution, easily detects the known binaries in the region including 1E 1743.1–2853 but does not see any emission from the GN also suggests that the nature of IGR J17456–2901 is not pointlike. These considerations lead us to conclude that IGR J17456–2901 is a compact diffuse emission region a few arcminutes in size where astrophysical processes give rise to thermal and non-thermal emission.

Finally, in § 4.1 we discussed the 20–40 keV morphology of the emission near the GC, and due to the very long effective exposure of 4.7 Ms, the maps in the different energy bands revealed that (1) as the brighter and softer sources IGR J17456–2901 and 1E 1743.1–2853 become fainter with increasing energy, a hard but dim emission about $6'$ from Sgr A* in the direction of positive longitudes appears, and that (2) the spectral index of this emission is quite hard and apparently qualitatively similar to that of IGR J17475–2822 (Sgr B2). This new source of soft γ -rays could well be closely related to the unidentified EGRET source 3EG J1746–2851 and to the giant molecular cloud G0.13–0.13.

We would like to thank Anne Decourchelle and Jean-Luc Sauvageot for their precious help with the *XMM-Newton* spectral extraction and analysis, Andrei Bykov and Francois Lebrun for useful and interesting discussions, Micheal Muno for providing the *Chandra* data on the transients and discussing the possible contributions from these to the flux of the central *INTEGRAL* source, and Katsuji Koyama for providing us with the *ASCA* map of the GC region at 6.4 keV. G. Bélanger is partly supported by the French Space Agency (CNES).

REFERENCES

- Aharonian, F., & Neronov, A. 2005a, *ApJ*, 619, 306
 ———. 2005b, *Space Sci. Rev.*, in press (astro-ph/0503354)
 Aharonian, F., et al. 2004, *A&A*, 425, L13
 ———. 2005a, *A&A*, 432, L25
 ———. 2005b, *Science*, 307, 1938
 Atoyan, A., & Dermer, C. D. 2004, *ApJ*, 617, L123
 Baganoff, F. K., et al. 2001, *Nature*, 413, 45
 ———. 2003, *ApJ*, 591, 891
 Balick, B., & Brown, R. L. 1974, *ApJ*, 194, 265
 Bélanger, G., et al. 2004, *ApJ*, 601, L163
 ———. 2005, *ApJ*, 635, 1095
 Bower, G., Yusef-Zadeh, F., & Roberts, D. 2005, *ApJ*, submitted
 Bykov, A. M. 2002, *A&A*, 390, 327
 Courvoisier, T. J.-L., et al. 2003, *A&A*, 411, L53
 Crocker, R. M., et al. 2005, *ApJ*, 622, 892
 Cuadra, J., Nayakshin, S., Springel, V., & Di Matteo, T. 2005, *MNRAS*, 360, L55
 Eckart, A., et al. 2004, *A&A*, 427, 1

- Eisenhauer, F., et al. 2005, *ApJ*, 628, 246
- Fatuzzo, M., & Melia, F. 2003, *ApJ*, 596, 1035
- Fryer, C. L., et al. 2005, *ApJ*, submitted (astro-ph/0506242)
- Gaensler, B. M., Pivovarov, M. J., & Garmire, G. P. 2001, *ApJ*, 556, L107
- Genzel, R., & Townes, C. H. 1987, *ARA&A*, 25, 377
- Genzel, R., et al. 2003, *Nature*, 425, 934
- Ghez, A. M., et al. 2004, *ApJ*, 601, L159
- . 2005, *ApJ*, 620, 744
- Goldoni, P., et al. 1999, *Astrophys. Lett. Commun.*, 38, 305
- Goldwurm, A., et al. 1994, *Nature*, 371, 589
- . 2003a, *ApJ*, 584, 751
- . 2003b, *A&A*, 411, L223
- . 2004, *Proc. 5th INTEGRAL Workshop*, ed. V. Schönfelder, G. Lichti, & C. Winkler (ESA SP-552; Dordrecht: ESA), 237
- Green, D. A. 2004, *Bull. Astron. Soc. India*, 32, 335
- Gros, A., et al. 2003, *A&A*, 411, L179
- Hartman, R. C., et al. 1999, *ApJS*, 123, 79
- Helfand, D. J., & Becker, R. H. 1987, *ApJ*, 314, 203
- Knödseder, J., et al. 2005, *A&A*, 441, 513
- Lebrun, F., et al. 2003, *A&A*, 411, L141
- Liu, S., & Melia, F. 2002, *ApJ*, 566, L77
- Liu, S., Melia, F., & Petrosian, V. 2005, *ApJ*, submitted
- Liu, S., Petrosian, V., & Melia, F. 2004, *ApJ*, 611, L101
- Maeda, Y., et al. 2002, *ApJ*, 570, 671
- Malet, I., et al. 1995, *ApJ*, 444, 222
- Markoff, S., Falcke, H., Yuan, F., & Biermann, P. L. 2001, *A&A*, 379, L13
- Markoff, S., Melia, F., & Sarcevic, I. 1997, *ApJ*, 489, L47
- . 1999, *ApJ*, 522, 870
- Mayer-Hasselwander, H., et al. 1998, *A&A*, 335, 161
- Melia, F., & Falcke, H. 2001, *ARA&A*, 39, 309
- Melia, F., et al. 1998, *ApJ*, 508, 676
- Muno, M. P., et al. 2004a, *ApJ*, 613, 326
- . 2004b, *ApJ*, 613, 1179
- . 2005a, *ApJ*, 622, L113
- . 2005b, *ApJ*, 633, 228
- Park, S., et al. 2004, *ApJ*, 603, 548
- Pavlinksky, M. N., Grebenev, S. A., & Sunyaev, R. A. 1994, *ApJ*, 425, 110
- Porquet, D., Decourchelle, A., & Warwick, R. S. 2003a, *A&A*, 401, 197
- Porquet, D., et al. 2003b, *A&A*, 407, L17
- . 2005a, *A&A*, 430, L9
- . 2005b, *A&A*, in press
- Revnivtsev, M. G., et al. 2004, *A&A*, 425, L49
- Sakano, M., et al. 2002, *ApJS*, 138, 19
- . 2004, *MNRAS*, 350, 129
- Schödel, R., Ott, T., Genzel, R., Eckart, A., Mouawad, N., & Alexander, T. 2003, *ApJ*, 596, 1015
- Sidoli, L., et al. 1999, *ApJ*, 525, 215
- . 2004, *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 75, 507
- Skinner, G. K., et al. 1987, *Nature*, 330, 544
- . 1990, *MNRAS*, 243, 72
- Tan, J. C., & Draine, B. T. 2004, *ApJ*, 606, 296
- Terrier, R., et al. 2003, *A&A*, 411, L167
- Ubertini, P., et al. 2003, *A&A*, 411, L131
- Winkler, C. 2003, *A&A*, 411, L1
- Yuan, F., Markoff, S., & Falcke, H. 2002, *A&A*, 383, 854
- Yuan, F., Quataert, E., & Narayan, R. 2003, *ApJ*, 598, 301
- Yusef-Zadeh, F., Hewitt, J. W., & Cotton, W. 2004, *ApJS*, 155, 421
- Yusef-Zadeh, F., Melia, F., & Wardle, M. 2000, *Science*, 287, 85
- Yusef-Zadeh, F., et al. 1996, *ApJ*, 466, L25
- . 2002, *ApJ*, 568, L121
- . 2005, *ApJ*, submitted (astro-ph/0510787)

REPEATED X-RAY FLARING ACTIVITY IN SAGITTARIUS A*

G. BÉLANGER,^{1,2} A. GOLDWURM,^{1,2} F. MELIA,³ P. FERRANDO,^{1,2} N. GROSSO,⁴
 D. PORQUET,⁵ R. WARWICK,⁶ AND F. YUSEF-ZADEH⁷

Received 2005 January 27; accepted 2005 August 17

ABSTRACT

Investigating the spectral and temporal characteristics of the X-rays coming from Sagittarius A* (Sgr A*) is essential to our development of a more complete understanding of the emission mechanisms in this supermassive black hole located at the center of our Galaxy. Several X-ray flares with varying durations and spectral features have already been observed from this object. Here we present the results of two long *XMM-Newton* observations of the Galactic nucleus carried out in 2004, for a total exposure time of nearly 500 ks. During these observations we detected two flares from Sgr A* with peak 2–10 keV luminosities about 40 times ($L_X \sim 9 \times 10^{34}$ ergs s⁻¹) above the quiescent luminosity: one on 2004 March 31 and another on 2004 August 31. The total duration of the first flare was about 4 ks. The second, simultaneously detected in the near-IR, lasted about 10 ks. The combined fit to the EPIC spectra yields photon indices of about 1.5 and 1.9 for the first and second flares, respectively. This hard photon index strongly suggests the presence of an important population of nonthermal electrons during the event and supports the view that the majority of flaring events tend to be hard and not very luminous.

Subject headings: black hole physics — Galaxy: center — Galaxy: nucleus — stars: neutron — X-rays: binaries — X-rays: general

1. INTRODUCTION

Sagittarius A*, the black hole at the Galactic center, is a source of fascination and curiosity for many in the astrophysical community. There are several reasons for this, including the fact that Sgr A* provides us with the most compelling evidence to date for the existence of supermassive black holes in the universe and is the closest such object (Schödel et al. 2003; Ghez et al. 2003). Its relative proximity allows us to investigate Sgr A*'s radiative characteristics, as well as those of its nearby environment, with great detail and excellent spatial and spectral resolution in all of the accessible wave bands. In addition, unlike more typical active and bright galactic nuclei, Sgr A* is very dim and shines at less than 10^{-9} (Melia & Falcke 2001) times the Eddington luminosity for an object of its mass, now thought to be $M \approx 3.4 \times 10^6 M_\odot$ (Schödel et al. 2003). This faintness is itself intriguing and raises many more questions about the conditions that exist in the environment surrounding the massive black hole.

And yet, this faintness may actually be a blessing in disguise for probing the innermost regions of this object, for it points to an optically thin envelope that is almost transparent to high-energy IR and X-ray photons produced during transient events manifested within a mere handful of Schwarzschild radii ($r_s \equiv 2GM/c^2$, or roughly 9×10^{11} cm) of the event horizon. Thus, the Galactic center's supermassive black hole provides a wonderful laboratory for the study of accretion and related phe-

nomena, including the formation and evolution of accretion disks, the causes and effects of magnetic reconnection, the emission characteristics from the acceleration of charged particles in the strong magnetic and gravitational fields, the relationship between radiation at different wavelengths, and the processes that give rise to these (see Melia & Falcke 2001 for a review).

In early 2001, the *Chandra X-Ray Observatory* detected what we now consider to be the first X-ray counterpart (Baganoff et al. 2003) to the radio source Sgr A*. The quiescent state of this source was characterized by a power-law photon index $\Gamma = 2.7^{+1.3}_{-0.9}$ and a derived 2–10 keV luminosity of $L_X = (2.2 \pm 0.4) \times 10^{33}$ ergs s⁻¹. It is thought that the same population of electrons that produces the synchrotron peak at submillimeter wavelengths give rise to this quiescent component through synchrotron self-Compton (SSC) (Liu & Melia 2001; Markoff et al. 2001).

In the fall of the same year, *Chandra* detected the first X-ray flare from this source (Baganoff et al. 2001). This flare lasted about 10 ks, had a harder photon index of $\Gamma = 1.3 \pm 0.6$, and reached a peak luminosity of $L_X = (1.0 \pm 0.1) \times 10^{35}$ ergs s⁻¹ (or a factor of 45 above the quiescent level). To this day, two additional bright flares from the direction of Sgr A*, with varying timescales and spectral features, have been detected and reported. Goldwurm et al. (2003) reported the detection of the rising portion of a flare from Sgr A* over some 900 s. They found a flare photon index of $\Gamma = 0.7 \pm 0.6$, compatible with the *Chandra* flare photon index within the errors, and they derived a peak luminosity of $L_X = (5.4 \pm 1.0) \times 10^{34}$ ergs s⁻¹ (a factor of 25 above quiescence). The most recent report of a flare from Sgr A* is that presented by Porquet et al. (2003). This flare was quite different from the two previous events, for it lasted roughly 2.7 ks, had a soft spectral index ($\Gamma = 2.5 \pm 0.3$), and reached a surprisingly high peak 2–10 keV luminosity of $L_X = (3.6 \pm 0.4) \times 10^{35}$ ergs s⁻¹. This corresponds to an unprecedented factor of 160 above the source's quiescent luminosity.

X-ray flaring activity in Sgr A* could be induced by a sudden enhancement of accretion (Liu & Melia 2002), from a swift acceleration of electrons in a magnetic flare near the black hole (Liu et al. 2004), within a jet (Markoff et al. 2001), or perhaps through

¹ Service d'Astrophysique, DAPNIA/DSM/CEA, 91191 Gif-sur-Yvette, France; belanger@cea.fr.

² Unité mixte de recherche Astroparticule et Cosmologie, 11 place Berthelot, 75005 Paris, France.

³ Department of Physics and Steward Observatory, University of Arizona, Tucson, AZ 85721.

⁴ Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble, Université Joseph-Fourier, 38041 Grenoble, France.

⁵ Max-Planck-Institute für extraterrestrische Physik, Munich D-85741, Germany.

⁶ Department of Physics and Astronomy, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK.

⁷ Department of Physics and Astronomy, Northwestern University, Evanston, IL 60208.

some other nonthermal process within a radiatively inefficient accretion flow (Yuan et al. 2003, 2004). Furthermore, short-timescale X-ray and IR flares could be much more difficult to detect if the luminosity of Sgr A* were even slightly larger, in which case the thermal SSC emission would possibly dominate over the nonthermal emission (Yuan et al. 2004). The recent detection of Sgr A* in the near-IR band in both the quiescent and flaring states (Genzel et al. 2003) and the more recent detection of a correlated increase in near-IR and X-ray flux (Eckart et al. 2004) provide further important constraints on building a comprehensive model of this source. Although relatively few instances of detected flares from Sgr A* have been reported, there appears to be two “types” of flares—the soft and hard—and a model that can naturally explain both of these types of events is presented in Liu et al. (2004).

We here present the results of two long *XMM-Newton* observations of Sgr A* and the Galactic center in which we detected two flares that rose to a factor of 40 above the quiescent luminosity from the direction of the central black hole, and several other, less significant events that could also be coming from Sgr A*. Both of these observations were conducted concurrently with *INTEGRAL* in order to investigate possible links in the manifestation of a sudden enhanced accretion, magnetic reconnection, or other type of event in the hard X-ray (2–12 keV) and soft gamma-ray (20–120 keV) domains. Furthermore, a set of other observations of Sgr A* covering the radio, submillimeter, and infrared frequencies, coordinated with the 2004 *XMM-Newton* large project, were also planned and partly performed, and two new transient radio sources were discovered with the VLA (Bower et al. 2005). The results from the *INTEGRAL* observations are reported in Bélanger et al. (2005), and those from the overall multi-wavelength campaign in Yusef-Zadeh et al. (2005). The two main flares, which we refer to as the factor-40 flares hereafter, occurred on timescales between 4000 and 10,000 s, and have similar spectral characteristics. These may be added to the statistics of detected flares from Sgr A* and add weight to the interpretation that there are indeed two types of flares, bright and soft or not so bright and hard, and that the majority of these events are of the latter kind. A larger sample of such events is essential for constructing a more robust classification—and thus identification—of the causes for this flaring activity in Sgr A*. Furthermore, a brightening of the region around Sgr A* by a factor of ~ 2 in the 2–10 keV band with respect to all previous *XMM-Newton* observations of the Galactic center is evident in both data sets. The astrometry-corrected fitted centroid of this emission coincides with the position of a bright transient lying about $3''$ south of Sgr A* and discovered by *Chandra* in the summer of 2004 (Muno et al. 2005a). Here we only briefly comment on the emission characteristics of this new source, CXOGC J174540.0–290031, during the *XMM-Newton* observations and refer the interested reader to Porquet et al. (2005) and Muno et al. (2005b) for further details.

The structure of this paper is as follows: In § 2 we describe the observations and the analysis methods used to reduce the data. In § 3 we present the results of the analysis, and in § 4 we discuss their possible implications and interpretations.

2. OBSERVATIONS AND METHODS OF ANALYSIS

The *XMM-Newton* satellite observed the Galactic center as part of a large project during revolutions 788 and 789, between 2004 March 28 and April 1, and then during revolutions 866 and 867, between 2004 August 31 and September 2, for a total exposure time of ~ 490 ks, during which the EPIC MOS and pn cameras were in Prime Full Window and Prime Full Window Extended modes, respectively, during epoch 1, and in Prime Full

TABLE 1
OBSERVATION LOG

ObsID	Start Time (UT)	End Time (UT)	Duration (UT)
788.....	2004 Mar 28, 14:57:08	2004 Mar 30, 04:44:00	112.6
789.....	2004 Mar 30, 14:46:36	2004 Apr 01, 04:35:49	123.4
866.....	2004 Aug 31, 03:12:01	2004 Sep 01, 16:45:58	130.1
867.....	2004 Sep 02, 03:01:39	2004 Sep 03, 16:35:35	131.4

Window during epoch 2. The log of the observations is presented in Table 1. We use epoch 1 to refer to the observation period spanning ObsIDs 788 and 789, and epoch 2 for the one spanning ObsIDs 866 and 867.

We generated event lists for the MOS1, MOS2, and pn cameras using the *emchain* and *epchain* tasks of the *XMM-Newton* Science Analysis System (SAS; ver. 6.1.0). These were subsequently filtered and used to construct images in two energy bands: 0.5–2 keV and 2–10 keV. The filter on the event pattern in imaging mode (PATTERN ≤ 12 for MOS and PATTERN ≤ 4 for pn) ensures that only events created by X-rays and free of cosmic-ray contamination are selected. Artifacts from the calibrated and concatenated data sets, as well as events near CCD gaps or bad pixels, are rejected by setting FLAG=0 as a selection criterion. A further selection on the maximum count rate in the 10–12 keV range (18 counts s $^{-1}$) for MOS and 12–14 keV range (22 counts s $^{-1}$) for pn was applied to exclude all periods of increased charged particle flaring activity. This stringent selection criterion was only applied to the image construction.

The heavy absorption in the direction of the Galactic center prevents photons from this region having energies below 1.5–2 keV from reaching us. For this reason, we used the 0.5–2 keV images of foreground stars to identify counterparts for astrometric corrections, and the 2–10 keV image to determine the flare centroid.

2.1. Astrometry

We identified three Tycho-2 and two *Chandra* sources with positional uncertainties of $0''.025$ and $0''.16$, respectively.⁸ Of these calibration sources, three were in the central MOS CCD and two just outside of it. This is an essential point in the astrometric corrections because the positional uncertainty of one MOS CCD relative to another is $\sim 1''.5$ and this therefore determines the minimum systematic positional uncertainty over the whole field of view. However, if we have at least three calibration sources in the central CCD, then we can reduce this systematic uncertainty for sources in that CCD.

The astrometric correction was done by first running *edetect_chain* using the 0.5–2 keV images to get a list of the detected sources with their fitted position and associated statistical uncertainty. Then, using *eposcorr*, which optimizes the correlation between the positions of the calibration sources and their X-ray counterparts, allowing for a displacement in right ascension and declination as well as rotation, we found the boresight corrections for the three EPIC instruments. The MOS cameras have smaller pixels and therefore a finer angular resolution than the pn instrument. We therefore used the MOS images for our

⁸ The astrometric sources are Tycho-2 6840-20-1, 6840-666-1, and 6840-590-1, and CXOGC J174545.2–285828 and CXOGC J174607.5–285951. Tycho-2 positions were taken from <http://www.astro.ku.dk/~cf/CD/data/catalog.dat>, and astrometric precision from Hog et al. (2000). *Chandra* positions are from Muno et al. (2003), and errors are from Baganoff et al. (2003).

TABLE 2
ASTROMETRIC CORRECTIONS

Parameter	ObsID 789	ObsID 866
R.A. offset.....	-2.67 ± 0.60	-0.88 ± 0.61
Decl. offset.....	-0.35 ± 0.56	-0.35 ± 0.46
Rotation.....	-0.20 ± 0.30	-0.05 ± 0.25
rms before correction.....	3.22	1.40
rms after correction.....	0.59	0.88

NOTE.—All quantities are given in arcseconds. The column ObsID 789 lists the parameter values for MOS2, and the column ObsID 866 lists those for MOS1. No significant rotational offset was detected in either case, and therefore none was applied in the analysis.

astrometric study of the observations during which the flares occurred, namely, ObsIDs 789 and 866. The results of this study are listed in Table 2, where we give the offsets and rms dispersion in the positions of the astrometric sources with respect to their reference positions before and after correction.

Although we performed this procedure for each individual camera as well as for the merged MOS event list, we used the MOS2 results for our analysis of the first flare (ObsID 789) and the MOS1 for the analysis of the second (ObsID 866), since these had the smallest dispersion after boresight corrections. We found that the merged MOS image systematically yielded smaller offsets in both coordinates and that the rms dispersion remained in the range $0''.9$ – $1''.2$ before and after boresight corrections were applied. This behavior is expected since the astrometric precision that is derived from calibrations and that relies on the knowledge of the position of one camera with respect to the other is stated as $1''.2$ (Kirsch 2005). So even though we can generally expect smaller offsets and dispersions before corrections when using the merged MOS image, as this naturally averages the astrometry of both MOS cameras, the minimum dispersion after corrections will always be around $1''.2$. Unusually large dispersions can be caused by the “splitting” of one or more of the astrometric sources by a column of bad pixels, as was seen in MOS2 during ObsID 866. Astrometric corrections maximize our ability to locate sources and to distinguish a flaring source from its closest known neighbor, as is our intention here.

We found that the change in position due to corrections of up to $2''.7$ in a given coordinate has negligible effects on the light curve and spectra that are constructed by integrating over a $10''$ radius around the source. This is primarily due to the shape of the instrument point-spread function, which is characterized by a very narrow peak and broad wings. As long as the peak is included in the extraction region, variations due to a shifted centroid are completely negligible. Each individual event list is treated separately to ensure proper good-time-interval corrections.

2.2. Light Curve Construction

The source extraction region is defined as a circular area of radius $10''$ centered on Sgr A*’s radio position: R.A. = $17^{\text{h}}45^{\text{m}}40^{\text{s}}.0383$, decl. = $-29^{\circ}00'28''.069$ (J2000.0; Yusef-Zadeh et al. 1999). The light curves for each observation were made from the event files of the EPIC instruments—MOS1, MOS2, and pn—using the times of the first and last events overall to determine the bounds used to define the temporal bins. We constructed a rate set for each event file, calculated the effective bin time defined as the sum of the good time intervals (GTIs) within a bin, applied the GTI corrections by multiplying each rate by the ratio of nominal bin time to effective bin time, and finally summed these corrected rates for all temporally coincident bins.

To correct for background fluctuations even though they are generally assumed to be negligible on a source extraction zone as small as $10''$, we extracted a background light curve from an annular region with inner and outer radii of $10''$ and $500''$ around Sgr A*. These background rates were also GTI-corrected and then rescaled to the area of the source extraction zone before being subtracted from the source rates. (The maximum background count rate we found for any given bin was of the order of 10% of the source count rate.)

This procedure yielded the background-subtracted, GTI-corrected light curves. The GTI correction was particularly important for the data of ObsID 789, during which high levels of background solar flare particles caused the saturation of buffers and thus the loss of data in the pn camera by switching it to counting mode for short time periods and so generating several short GTIs. In such instances, the count rate must be estimated on longer timescales, and thus we used larger binning.

For all light curves, we excluded the bins that correspond to time periods that do not have simultaneous coverage by all three instruments and those with very high count rates seen in only one of the instruments; these are identified by looking at the ratio of the MOS to pn count rates. All light curves presented in this paper are combined EPIC light curves (MOS1+MOS2+pn).

2.3. Spectral Extraction

The source and background spectra for each flare were extracted over a circular region with a radius of $10''$ centered on Sgr A*, and in each case, the backgrounds were integrated over about 50 ks during “quiescent” periods—excluding flares and eclipses—as done by Goldwurm et al. (2003) and Porquet et al. (2003). This ensures that the spectrum is composed almost entirely of flare photons, such that the contribution from the underlying nearby emission is negligible. The time windows over which each flare spectrum was extracted were optimized for maximum signal-to-noise ratio and are [197161000:197163000] for the 2004 March 31 event and [210335000:210337500] for the 2004 August 31 flare, given as *XMM-Newton* time in units of seconds (see Figs. 4 and 6). These intervals correspond to 2000 and 2500 s, respectively, and do not cover the entire event.

Since the source photons represent between about 35% and 50% of the total counts and since these are in all cases quite low in number, we used the *C*-statistic (Cash 1979) to fit and derive the model parameters. In the context of this statistic, the source spectra do not have to be rebinned. However, the method requires a moderately well defined background with at least 5–8 counts per bin, and we therefore grouped these using *grppha* such that each bin contains a minimum of 10 counts. To ensure coherence between the source and background spectra, we applied exactly the same grouping to the source spectra. Regrouping in larger bins, with 20 counts per bin for example, gives parameter values that are statistically consistent with the ones derived from the ungrouped data set.

The redistribution and ancillary response matrices were generated for each source spectrum using the *rmfgen* and *arfgen* SAS tasks.

3. RESULTS

Figures 1 and 2 show the epoch 1 and epoch 2 light curves, respectively. Two large flares and a few smaller ones are apparent in the second portion of Figure 1 and the first portion of Figure 2. More detailed views of the flaring periods are shown in Figures 4 and 6.

During epoch 1 the flaring activity occurs toward the end the observation, where a large event is preceded by two smaller ones.

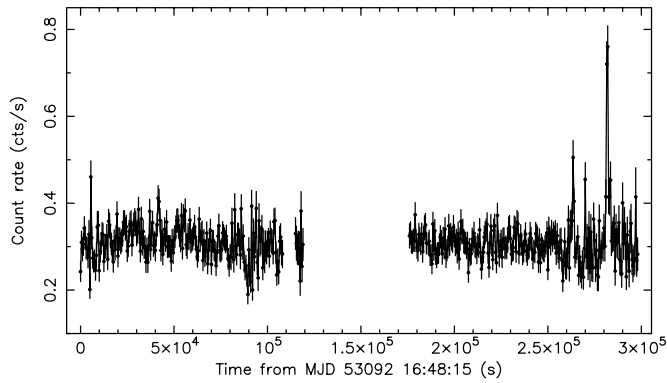


FIG. 1.—Light curve in the 2–10 keV energy range for a circular region of radius $10''$ centered on Sgr A* binned in 500 s intervals for the epoch 1 observations. MJD 53,092 corresponds to 2004 March 28.

In epoch 2 the large flare and its precursor occur near the start of the first observation. In the latter, the main event is closely followed by a small peak and another statistically significant flare closer to the end of ObsID 866 (marked by an arrow in Fig. 2). Two small peaks at the very end of the same observation have significances just above 3σ . In addition, there is a distinct periodic eclipse clearly seen over more than four complete cycles in the course of ObsID 866 and also present in ObsID 867, even though it is not as evident.

In the next section, we present a detailed survey of the results obtained for the most significant flares, followed by an analysis of the temporal characteristics of the light curves. We show that the two factor-40 flares are coming from the direction of Sgr A* and not from the transient binary system CXOGC J174540.0–290031, to which the eclipses can be attributed (see Porquet et al. 2005).

3.1. Flare Analysis

The position of the flaring source was determined by running `edetect_chain` on an image of the central region constructed by selecting events in a temporal window corresponding to the duration of the flare and applying the astrometric corrections to the fitted position of the most significant detection. The resulting flaring source position for the 2004 March 31 event was found to be R.A. = $17^{\text{h}}45^{\text{m}}40^{\text{s}}.08$, decl. = $-29^{\circ}00'28''.48$ (J2000.0) with an uncertainty in the position of $1''.12$, calculated by combining the statistical uncertainty on the fitted position ($0''.44$), the boresight correction ($0''.82$), and the rms dispersion in the astrometric sources after correction ($0''.62$). This position is at $0''.66$ from the radio position of Sgr A* and $2''.58$ from the new transient CXOGC J174540.0–290031, the closest known X-ray source to the central black hole. This permits us to unambiguously associate the flaring source with Sgr A*.

For the 2004 August 31 flare, the position of the flaring source was found to be R.A. = $17^{\text{h}}45^{\text{m}}40^{\text{s}}.14$, decl. = $-29^{\circ}00'28''.40$ (J2000.0) with a positional uncertainty of $1''.31$. This is $0''.52$ from Sgr A* and $2''.98$ from CXOGC J174540.0–290031; therefore the association of this flaring source with the central black hole is once again unambiguous. This event was simultaneously detected by the *Hubble Space Telescope* at near-IR wavelengths (see Yusef-Zadeh et al. 2005 for further details). The centroid of the 2–10 keV emission in the nonflare period of ObsID 866 is located just $0''.71$ from CXOGC J174540.0–290031 but $2''.38$ from Sgr A*. This strongly suggests that this source does indeed contribute a large portion of the X-ray flux in this band, but that it is without a doubt not the flaring source.

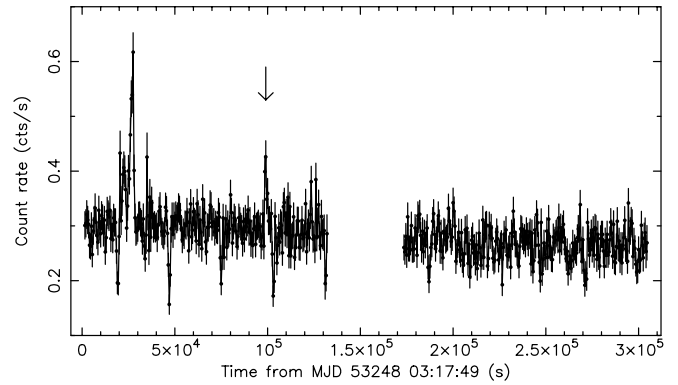


FIG. 2.—Light curve in the 2–10 keV energy range for a circular region of radius $10''$ centered on Sgr A* binned in 500 s intervals for the epoch 2 observations. The arrow marks an isolated peak with statistical significance of about 5σ . MJD 53,248 corresponds to 2004 August 31.

As an example, we show in the left-hand panel of Figure 3 an image of the Galactic center during the August 31 flare composed of events selected from the same temporal window as the one used to build the flare spectrum (see Fig. 6). In black, the position of Sgr A* is crossed and labeled, that of CXOGC J174540.0–290031 is simply marked by a cross for clarity, and the circles show the uncertainty on the position after boresight corrections. In green, the cross marks the fitted position of the brightest source detected in the flare image, and the circles indicate the 68% and 90% confidence regions derived by combining the statistical error on the fit ($0''.60$), the error from the boresight correction ($0''.77$), and the rms ($0''.88$) that we take as a systematic uncertainty. In the right-hand panel, we see the nonflare image of the same region constructed by selecting all event used to build the background spectrum. The labeling scheme is the same as in the left panel. Each pixel is $1''.1$ in size, matching the sky projected size of the camera's physical pixels. A wavelet filter was applied to smooth the image for presentation purposes only.

It is evident that the centroid of the emission during the flare is significantly shifted toward Sgr A* and that the transient source CXOGC J174540.0–290031 can be excluded as the flaring source at the 90% confidence level. In the nonflare period, the emission is very closely centered on the transient binary—the central black hole's closest known, hard X-ray emitting neighbor—and in this case, Sgr A* can be excluded at more than the 90% confidence level as the source of this emission. The error circles on the fitted centroid of the nonflare image are smaller because the statistical uncertainty on the fit is $0''.22$ compared with $0''.60$ for the flaring source. Combining this value with the same boresight correction uncertainty and rms as was used in the analysis of the flare image yields a total uncertainty of $1''.19$.

The first flaring period occurred on 2004 March 31 (Fig. 4) and contains one of the two factor-40 flares detected over the course of all four pointings, preceded by two smaller ones. The most prominent flare took place around 23:05 and peaked at $0.76\text{ counts s}^{-1}$, estimated on the basis of 500 s time bins. This event lasted ~ 2.5 ks from rise to fall. The pn (*black*), MOS1 (*red*), and MOS2 (*green*) spectra for this flare are shown in Figure 5.

We fitted each spectrum individually and also simultaneously. The low statistics limit the reliability of the MOS results, and for this reason we present the best-fit parameters for the pn data, as well as for the combined data set, in Table 3. Three models were tested: absorbed power law, blackbody, and bremsstrahlung. All give satisfactory fits. We used the `pegpwr1w` model in XSPEC version 11.3.1, in which the total unabsorbed flux over the range

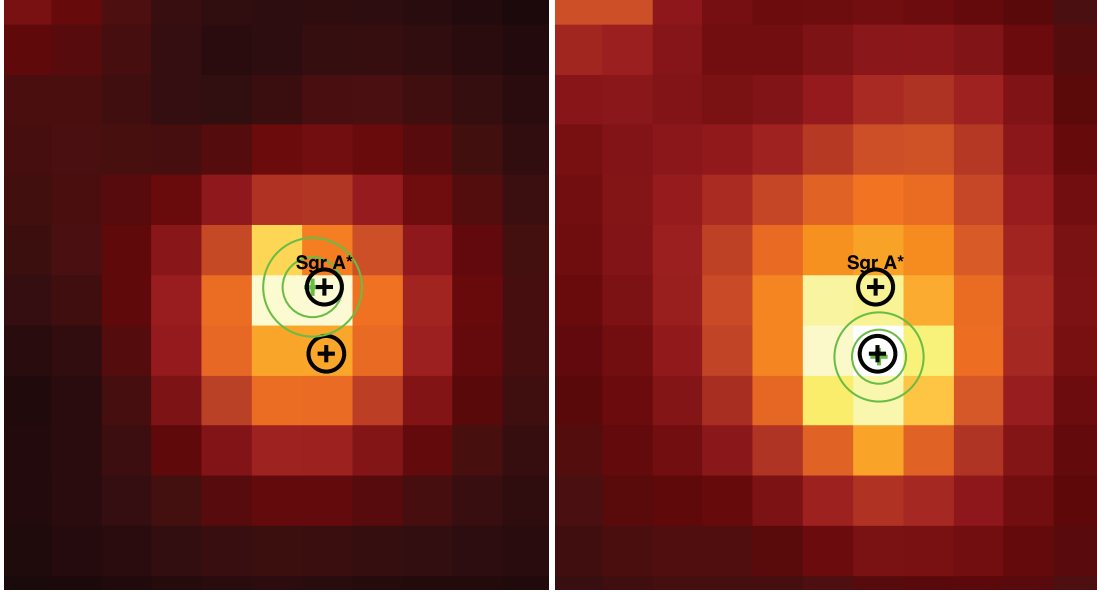


FIG. 3.—*Left*: Smoothed MOS2 image of the August 31 flare with an exposure time of 2000 s. *Right*: Average nonflare image with an exposure of about 50 ks. The boresight-corrected position of Sgr A* is labeled, and that of CXOGC J174540.0–290031 is marked by a cross. The black circles indicate the 1σ uncertainty on the position due to the astrometric correction. The green cross and circles mark the fitted emission centroid and the associated uncertainty at the 68% and 90% confidence levels.

of the fit is used as the normalization. This allows the photon index and normalization to be fit as independent parameters in the model, and allows us to derive the uncertainty on the flux directly from this normalization.

For the pegged power-law model, the best-fit values of the combined data set are a photon index of $\Gamma = 1.5 \pm 0.5$ with a column density of $N_H = (8.3 \pm 2.5) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. The average unabsorbed flux during the flare was found to be $(6.35 \pm 0.45) \times 10^{-12} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Since the count rate at the peak is about twice the average, we estimate that the maximum flux is also about twice the average and so that the peak 2–10 keV luminosity is around $10^{35} \text{ ergs s}^{-1}$ at a distance of 8 kpc, a factor of 45 above quiescence.⁹

The blackbody was best fit with a temperature of $1.9 \pm 0.3 \text{ keV}$ and absorbing column of $(4.1 \pm 1.7) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. Finally, fitting a bremsstrahlung model resulted in an absorption column of

$(7.8 \pm 1.9) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ —similar to that of the power law—and a temperature around 35 keV. The error range on the temperature, however, is huge and therefore not constraining at all. The large upper bounds in the error of the bremsstrahlung temperature probably reflect the fact that there is no statistically significant break in the spectrum. The best-fit parameter values, fluxes, and luminosities for the power-law and blackbody models are given in Table 3.

The respective occurrence times, peaks, and durations of the two small flares that preceded it are 17:59, $0.51 \pm 0.04 \text{ counts s}^{-1}$ ($\sim 5\sigma$), and 1500 s for the first, and 19:48, $0.45 \pm 0.04 \text{ counts s}^{-1}$ ($\sim 4\sigma$), and 1000 s for the second. These two events are marked by green arrows in Figure 4. Unfortunately, the short duration and lower signal-to-noise ratio of these events prevent us from doing their spectral analysis.

The second major flare was on 2004 August 31 and is shown in detail in Figure 6. The large flare is preceded very closely by what

⁹ We refer to both events as factor-40 flares for simplicity.

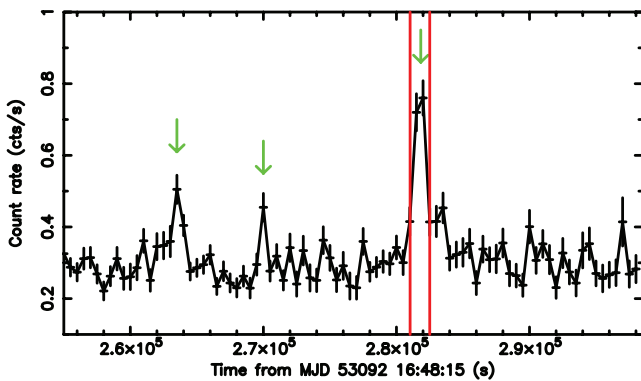


FIG. 4.—Zoom on the flare of 2004 March 31 with time bins of 500 s where the first factor-40 flare occurred. Its significance is about 10σ . The red lines delineate the time window used in the spectral extraction. Two other smaller flares are marked by the green arrows and have significances of about 5σ and 4σ , respectively. MJD 53,092 corresponds to 2004 March 28.

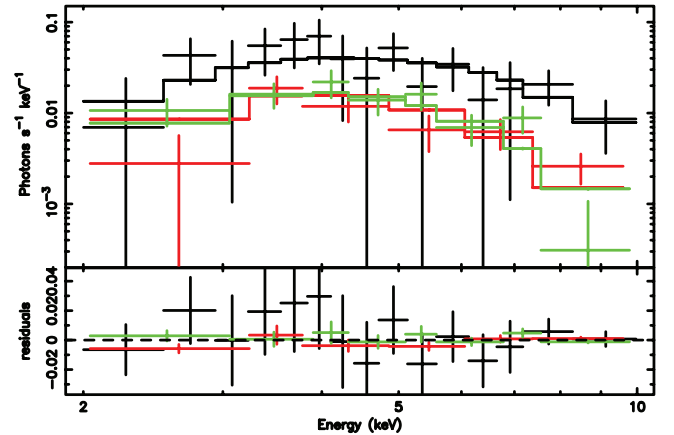


FIG. 5.—EPIC spectra during the Sgr A* flare of 2004 March 31. The spectra are shown with the best-fit absorbed power-law model and the corresponding residuals. The fit is done in the range 2–10 keV. The pn spectrum is shown in black, and the MOS1 and MOS2 spectra are in red and green, respectively.

TABLE 3
SPECTRAL CHARACTERISTICS OF X-RAY FLARES

DATE	INSTR.	POWER LAW					BLACKBODY					
		N_H (10^{22} cm $^{-2}$)	Γ	$F_X(2-10)$ (10^{-12} ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)	$L_X(2-10)$ (10^{34} ergs s $^{-1}$)	C/bins	N_H (10^{22} cm $^{-2}$)	kT (keV)	Norm (10^{-5})	$F_X(2-10)$ (10^{-12} ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)	$L_X(2-10)$ (10^{34} ergs s $^{-1}$)	C/bins
Mar 31.....	pn	$8.0^{+3.3}_{-2.8}$	$1.7^{+0.6}_{-0.6}$	$4.0^{+0.4}_{-0.9}$	$5.1^{+0.3}_{-0.7}$	689/740	$3.4^{+2.3}_{-1.9}$	$1.9^{+0.5}_{-0.3}$	$7.4^{+1.6}_{-1.2}$	$4.0^{+1.2}_{-1.6}$	$3.6^{+0.7}_{-1.4}$	691/740
	All	$8.3^{+2.5}_{-2.1}$	$1.5^{+0.5}_{-0.4}$	$4.0^{+0.3}_{-0.4}$	$4.9^{+0.9}_{-0.7}$	883/936	$4.1^{+1.7}_{-1.5}$	$1.9^{+0.2}_{-0.3}$	$7.4^{+1.6}_{-0.8}$	$3.8^{+0.7}_{-0.9}$	$4.6^{+0.5}_{-0.9}$	886/936
Aug 31	pn	$10.0^{+3.4}_{-2.5}$	$1.3^{+0.3}_{-0.5}$	$2.7^{+0.2}_{-0.4}$	$3.4^{+0.8}_{-0.5}$	883/731	$6.5^{+2.3}_{-1.7}$	$2.1^{+0.4}_{-0.3}$	$5.9^{+1.5}_{-0.8}$	$2.6^{+0.5}_{-0.9}$	$2.6^{+0.4}_{-0.8}$	883/731
	All	$12.5^{+3.4}_{-2.8}$	$1.9^{+0.5}_{-0.5}$	$2.7^{+0.2}_{-0.4}$	$4.3^{+1.2}_{-0.8}$	1082/913	$7.1^{+2.3}_{-2.1}$	$1.8^{+0.3}_{-0.2}$	$5.7^{+0.9}_{-0.5}$	$2.6^{+0.4}_{-0.4}$	$2.9^{+0.3}_{-0.7}$	1086/913

NOTES.—Errors on fitted parameters correspond to the 68% confidence interval. Flux density for the power-law model is normalized over the range from 2 to 10 keV and corresponds to the total unabsorbed flux in this range. The listed flux values are absorbed with the associated column density, and the luminosity is calculated using the power-law normalization and is derived for a distance of 8 kpc to the Galactic center. In the blackbody model, the normalization corresponds to the dimensionless ratio of the luminosity in units of 10^{39} ergs s $^{-1}$ to the distance in units of (10 kpc) 2 . The instrument column refers to the instrument whose data was used in the fit; “All” refers to the combination of pn, MOS1, and MOS2. “ C/bins ” refers to the value of the C -statistic over the number of bins used.

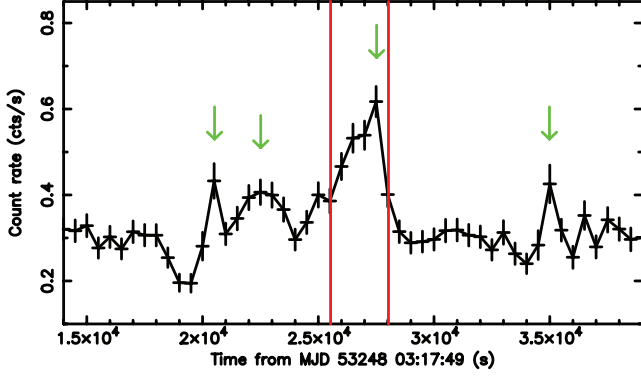


FIG. 6.—Light curve of the 2004 August 31 flare binned in 500 s intervals. Green arrows point out local peaks with respective significances of about 4, 5, 10, and 4σ . We show the base level of the light curve before and after the flare for reference. The drop in flux at the base of the precursor corresponds to the first of five eclipses in the binary system CXOGC J174540.0–290031 detected during ObsID 866. MJD 53,248 corresponds to 2004 August 31.

we will call a double-peaked precursor that lasted about the same length of time as the flare itself. Furthermore, we see a $\sim 30\%$ change in flux over about 900 s or 15 minutes between the two peaks of the precursor that constrains the emitting region to less than 2 AU at a distance of 8 kpc. The first peak of the precursor occurred at around 9:00, and the flare that followed rose to its maximum at about 11:05 with a count rate of 0.62 ± 0.03 counts s^{-1} for 500 s bins. Both the precursor and the flare lasted ~ 5000 s, and so the whole flaring period had a duration of about 10,000 s from rise to fall. The narrow peak following the flare occurred at 13:01, and the last flare (marked by an arrow in Fig. 2) occurred the next day, 2004 September 1, at 6:48. Figure 7 shows the pn (black), MOS1 (red), MOS2 (green) spectra of the flaring event with the best-fit absorbed power-law model and residuals.

This flare was modeled in the same way as was done for the March 31 flare, and the detailed spectral fitting results are listed in Table 3. The combined spectrum was best fit with an absorbed power law of photon index $\Gamma = 1.9 \pm 0.5$ and column density $N_H = (12.5 \pm 3.4) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. For the blackbody model, the temperature was 1.8 keV and the absorbing column density was $(7.1 \pm 2.3) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. The bremsstrahlung column density was found to be 11.3 ± 2.5 with a temperature around 15 keV, but once again the error range is so large that this value cannot be constrained. The low statistics severely limit our ability to detect spectral variations during the flares. The average 2–10 keV luminosity of this flare is around $4.3 \times 10^{34} \text{ ergs s}^{-1}$ (see Table 3), and as in the case of the March 31 flare, we estimate the peak luminosity to be about twice the average and thus that it reached a maximum intensity around 40 times the quiescent luminosity of Sgr A*.

A summary of the basic temporal features of the two factor-40 flares are given in Table 4. This includes the start, peak, and end times of the flares given in UTC and *XMM-Newton* time in seconds to facilitate reference to the data. We also listed the peak count rate and the deviation from the mean in units of sigma.

3.2. Timing Analysis

The cyclical decrease in flux observed during ObsID 866 (first portion of Fig. 2) occurs with a period of about 8 hr and is most probably due to an eclipse in the binary system CXOGC J174540.0–290031. A complete analysis of the *XMM-Newton* observations of this transient source is presented by Porquet et al. (2005), and the results of the *Chandra* observations are given by Munro et al. (2005b).

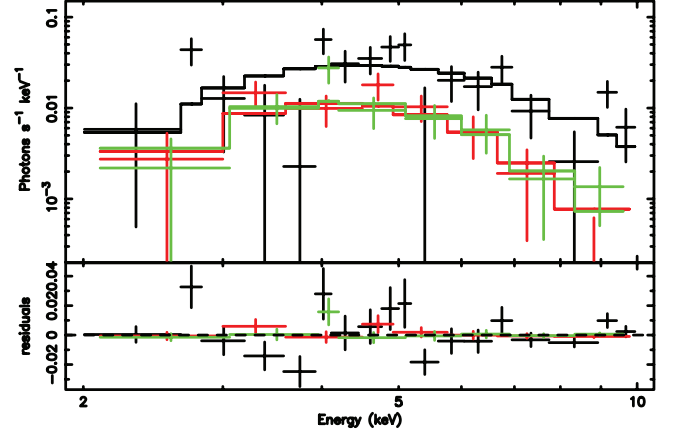


FIG. 7.—EPIC spectra during the Sgr A* flare of 2004 August 31 fitted in the range 2–10 keV. The colors are the same as in Fig. 5.

A spectral density analysis of the X-ray data from Sgr A* was performed, and since *XMM-Newton*'s spatial resolution severely limits our ability to distinguish the quiescent emission of Sgr A* from that of its surroundings, temporal structures in the X-ray emission detected by *XMM-Newton* from the Galactic center can only be attributed to Sgr A* with confidence if seen during a flare, when the flux rises substantially above the quiescent emission. Therefore, periodic features seen in the base level of the light curve cannot readily be attributed to Sgr A*. Furthermore, a period detected during a flare can only be confidently attributed to Sgr A* if it is not present in the rest of the light curve.

Since the range of frequencies and resolution in a periodogram are primarily functions of the total length of the observation and sampling or bin time, only the second of the two factor-40 flares allowed us to perform a meaningful search for periodic modulations. This event lasted about 10 ks, including the precursor. This is about 4 times longer than the first.

The first analysis revealed a periodic structure that could be significant, but the proper treatment of the signal that includes white and possibly a component of red noise requires a detailed analysis that is quite complex and that we have begun but will present elsewhere upon completion.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

We observed the neighborhood of Sgr A* for more than 3 consecutive days from 2004 March 28 to April 1, and for an additional 3 consecutive days from 2004 August 31 to September 3. Both observations were interrupted for only ~ 30 ks, and during each of these observation periods we detected flaring activity composed in each case of a large flare accompanied by smaller ones. The two main flares are positionally coincident with Sgr A*, and as did Baganoff et al. (2001), we associate these with the supermassive black hole at the center of the Milky Way, given our current knowledge of the region surrounding this source. These flares, both with peak luminosities about 40 times that of the assumed quiescent level, exhibit similar spectral characteristics: a hard photon index of $\Gamma \approx 1.5$ – 1.9 and a column density of $N_H \approx 8$ – $13 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. These parameter values are more akin to those of the first two detected flares (Baganoff et al. 2001; Goldwurm et al. 2003) than to those of the very bright flare reported by Porquet et al. (2003).

There were a total of three flares with significance greater than 3σ , corresponding to a factor of 15 above Sgr A*'s quiescent level in ObsID 789 and the same number in ObsID 866, if we

TABLE 4
BASIC FEATURES OF X-RAY FLARES

PARAMETER	2004 MARCH 31			2004 AUGUST 31		
	UTC Time	<i>XMM</i> Time (s)	Other Data	UTC Time	<i>XMM</i> Time (s)	Other Data
Flare start time.....	22:48	1.9716050 + 08	...	09:58	2.1033350 + 08	...
Peak occurrence time.....	23:09	1.9716175 + 08	...	11:05	2.1033750 + 08	...
Flare end time.....	23:22	1.9716250 + 08	...	11:22	2.1033850 + 08	...
Duration (s).....	...	...	2500	...	...	5000
Peak count rate (counts s ⁻¹).....	...	...	0.760 ± 0.048	...	...	0.617 ± 0.035
Mean count rate (counts s ⁻¹).....	...	...	0.303 ± 0.002	...	...	0.293 ± 0.002
Deviation from mean (σ).....	...	...	9.6	...	...	9.7

NOTES.—Error bars correspond to the 68% confidence interval. Count rates and times are estimated using 500 s time bins, and all quantities are derived from the count rate optimized spectral extraction window.

consider the precursor to be a separate flaring event. Although we cannot determine the position of the smaller flares accurately and thus cannot attribute them to Sgr A* with certainty, if these are indeed coming from the central black hole, then irrespective of the temporal distribution of these flares, our estimate of their average occurrence rate is about 1 per day. This estimate agrees with those based on *Chandra* observations performed between 1999 and 2002 (Baganoff 2003). Note that flares from Sgr A* appear to occur in clusters.

In light of the recently detected near-IR spectrum of Sgr A* (Genzel et al. 2003) and of the constraints that it imposes on the various emission models for this source, the flares we detected could have resulted from a sudden increase in accretion accompanied by a reduction in the anomalous viscosity, which would point to thermal bremsstrahlung as the X-ray emission process. This would give rise to a hard spectrum, unlike the softer one expected from a synchrotron self-Compton process (Liu & Melia 2002).

Another possibility is that the flares arose from the quick acceleration of electrons in the accretion flow near the black hole, producing either a two-component distribution characterized by a broken power law, with steep low-energy and flat high-energy components, or a modified thermal distribution with a high-energy enhancement (see, e.g., Liu et al. 2004; Yuan et al. 2003, 2004). In either of these cases, the lower energy electrons produce the near-IR emission as seen in the August 31 flare, and the high-energy distribution produces the hard X-rays. Further, the rather short timescale at the peak (~ 2500 – 4500 s) and hard spectral index ($\Gamma \approx 1.7$) of the flares would, according to this model, favor magnetic reconnection as the engine of the event.

In either of these two scenarios—an accretion instability or a magnetic reconnection event—one could expect to see a modulation in the light curve, mirroring the underlying Keplerian pe-

riod of the emitting plasma. Indications of the presence of such a periodic modulation during a near-IR flare were presented by Genzel et al. (2003) and during an X-ray flare by Aschenbach et al. (2004). These results must be confirmed by similar detections in other events seen in the near-IR and X-ray bands. A search for such a semiperiodic modulation in the longer of the two factor-40 flares from Sgr A* presented here is under way, and the results will be reported elsewhere.

The accretion instability scenario predicts a strong correlation between the submillimeter/IR and the X-ray photons with no or little change in the millimeter flux density. The two-component synchrotron model predicts possible, although not necessary, correlations between X-ray and near-IR flares, with larger X-ray amplitudes in the case of simultaneous flaring, important variations in the spectral slopes of the X-ray flares compared with those in the near-IR flares, and small amplitude variability in the radio and submillimeter wavebands. It is on this last point that we could distinguish the accretion-induced X-ray flare model from the two-component synchrotron model.

G. Bélanger would like to thank Jean Ballet, Monique Arnaud, Jean-Luc Sauvageau, and Anne Decourchelle for their kind help with several aspects of the *XMM-Newton* analysis, and Michael Munro, Régis Terrier, and Matthieu Renaud for several useful discussions. G. B. is grateful to the referee, whose comments were very pertinent and led to a finer analysis and deeper understanding of the statistical methods used in this task. G. B. acknowledges financial support from the French Space Agency (CNES). This work is based on observations obtained with *XMM-Newton*, an ESA science mission with instruments and contributions directly funded by ESA member states and the USA (NASA).

REFERENCES

- Aschenbach, B., et al. 2004, *A&A*, 417, 71
Baganoff, F. K. 2003, AAS HEAD Meeting, 7, 03.02
Baganoff, F. K., et al. 2001, *Nature*, 413, 45
———. 2003, *ApJ*, 591, 891
Bélanger, G., et al. 2005, *ApJ*, in press
Bower, G., et al. 2005, *ApJ*, 633, 218
Cash, W. 1979, *ApJ*, 228, 939
Eckart, A., et al. 2004, *A&A*, 427, 1
Genzel, R., et al. 2003, *Nature*, 425, 934
Ghez, A. M., et al. 2003, *ApJ*, 586, L127
Goldwurm, A., et al. 2003, *ApJ*, 584, 751
Hog, E., et al. 2000, *A&A*, 363, 385
Kirsch, M. 2005, EPIC Status of Calibration and Data Analysis (Madrid: ESA), <http://xmm.vilspa.esa.es/docs/documents/CAL-TN-0018-2-4.pdf>
Liu, S., & Melia, F. 2001, *ApJ*, 561, L77
Liu, S., & Melia, F. 2002, *ApJ*, 566, L77
Liu, S., Petrosian, V., & Melia, F. 2004, *ApJ*, 611, L101
Markoff, S., et al. 2001, *A&A*, 379, L13
Melia, F., & Falcke, H. 2001, *ARA&A*, 39, 309
Munro, M., et al. 2003, *ApJ*, 589, 225
———. 2005a, *ApJ*, 622, L113
———. 2005b, *ApJ*, 633, 228
Porquet, D., et al. 2003, *A&A*, 407, L17
———. 2005, *A&A*, in press
Schödel, R., et al. 2003, *ApJ*, 596, 1015
Yuan, F., Quataert, E., & Narayan, R. 2003, *ApJ*, 598, 301
———. 2004, *ApJ*, 606, 894
Yusef-Zadeh, F., Choate, D., & Cotton, W. 1999, *ApJ*, 518, L33
Yusef-Zadeh, F., et al. 2005, *ApJ*, submitted (astro-ph/0510787)

5. Projet de recherche et perspectives

Le domaine de l'astrophysique des trous noirs galactiques restera mon intérêt premier dans les années à venir. Les questions ouvertes sont passionnantes, comme le projet de recherche que je compte poursuivre et qui, d'une certaine manière, s'articule tout naturellement sur mes travaux antérieurs.

Mon programme de recherche pour les années à venir se décline en trois parties :

- La poursuite du programme d'observations des trous noirs galactiques avec les satellites et les observatoires sol actuellement en opération.
- L'exploitation des nouveaux observatoires qui seront mis prochainement en service, en particulier dans la bande des hautes et très hautes énergies (GeV, TeV).
- La participation directe à la définition, au développement et à l'exploitation scientifique d'une nouvelle mission d'astronomie à haute énergie, pour l'exploration des phénomènes non thermiques dans les sources célestes.

Ce programme concerne les deux thèmes scientifiques présentés dans ce mémoire, mais aussi plusieurs autres sujets auxquels je suis intéressé (systèmes binaires avec étoiles à neutrons, émission diffuse non thermique dans la région du centre galactique, AGN).

5.1 Le futur immédiat : les programmes d'observation en cours

5.1.1 Systèmes binaires X à trous noirs

En chapitre 3, j'ai montré comment SIGMA/GRANAT a été essentiel pour la découverte et pour les premières études des trous noirs galactiques dans les systèmes binaires. Ensuite, des observatoires comme Compton-GRO, Beppo-SAX et Rossi-XTE ont élargi considérablement notre connaissance des phénomènes qui interviennent dans ces systèmes. INTEGRAL (couplé à RXTE, Chandra, XMM-Newton et SWIFT) reprend maintenant le flambeau et commence à fournir des résultats nouveaux et importants. INTEGRAL est encore au début de sa vie opérationnelle (la mission a été prolongée jusqu'en 2010). Dans une certaine mesure, en raison d'aléas non favorables (le ciel a été

avare de sources transitoires à trou noir dans les trois dernières années), j'estime qu'INTEGRAL n'a pas encore été exploité aux mieux de ses possibilités, dans le domaine des trous noirs galactiques.

Bien que la phénoménologie complexe de ces systèmes soit mieux connue à basse énergie, nous manquons encore d'un modèle unifié qui puisse expliquer les processus physiques à l'origine des différentes transitions entre les états. Les questions qui restent ouvertes sont essentiellement les suivantes :

- Origine, géométrie et localisation de la couronne chaude.
- Origine du jet et sa relation avec la composante à haute énergie et le disque d'accrétion.
- Présence et nature de la composante non thermique.
- Raisons des changements d'états et des séquences des transitions.
- Présence de raies d'annihilation.

Je pense que la première voie pour expliquer ces points et arriver peut être à une vision globale des processus qui se déroulent dans ces systèmes, est de caractériser pleinement la composante à haute énergie. Pour cela, il faudra exploiter au maximum les instruments X et gamma d'INTEGRAL, RXTE, SWIFT, XMM et Suzaku (le satellite japonais mis en orbite en 2005). Nous espérons par exemple observer bientôt avec INTEGRAL une nova X brillante (du type Nova Muscae 91 ou XTE J1550), avec des flux bien plus élevés de ceux de Cyg X-1 et avec plusieurs transitions d'états. Nous pourrons ainsi rechercher plus aisément les composantes spectrales non thermiques dans les bandes d'énergie élevée (300-1000 keV), les mettre en relation avec les propriétés de variabilité (QPO) et éventuellement détecter des raies aux énergies de la raie d'annihilation électron positon. Cette recherche devra être couplée, bien entendu, à des mesures fines des variations temporelles (avec par exemple RXTE) et à des mesures en radio pour évaluer la présence et les caractéristiques de jets.

Dans ce cadre, nous avons commencé à préparer un programme d'observation. Nous avons déjà un programme approuvé ($4 \cdot 10^4$ s, PI Cadolle Bel) dans le cadre de l'appel d'offre (AO-11) de RXTE pour l'observation, en 2006-2007, de deux sources transitoires nouvelles (observation de l'état dur et de l'état mou pour chacune d'elles). Nous comptons soumettre des propositions INTEGRAL pour le programme de temps ouvert et maintenir les collaborations existantes pour organiser les campagnes d'observations multi longueurs d'onde (radio, infrarouge) nécessaires.

5.1.2 Centre galactique

En ce qui concerne le centre galactique, j'ai démontré en chapitre 4 que nous sommes sur le point de découvrir la nature des sursauts X de Sgr A^{*}, la source identifiée avec le trou noir massif de la Galaxie. La clef semble être dans la mesure simultanée des spectres X et infrarouge (et submillimétrique) pendant les sursauts, pour contraindre le mécanisme d'émission (synchrotron, Compton inverse ou bremsstrahlung) et la localisation et dynamique des particules responsables des émissions observées (disque d'accrétion ou jet).

Un effort particulier doit être entrepris pour établir si il y a une périodicité dans les sursauts X de Sgr A^{*} et à quelles période. Comme expliqué auparavant, cela nous donnerait enfin une mesure du spin et de la masse du trou noir massif et elle pourrait conduire à mettre en évidence les effets de la relativité générale en champ gravitationnel intense, un objectif majeur de l'astrophysique moderne. Dans le prochains mois, nous allons conclure cette recherche sur les données XMM disponibles, notamment sur celles du sursaut du 30 août 2004. Nous appliquerons ensuite les procédures développées sur des nouvelles données.

Nous avons d'ors et déjà un programme de $\sim 2 \cdot 10^5$ s approuvé grâce à une proposition d'observation acceptée dans le dernier appel d'offre de XMM-Newton (AO-5), en collaboration avec l'Institut Max Planck de Garching (PI : Porquet). Nous souhaitons bâtir à nouveau autour des observations XMM un vaste programme multi longueurs d'onde (radio, sub-millimétrique, infrarouge, gamma) avec la même collaboration internationale qui a mené le programme 2004. Les éléments clefs seront les observations simultanées avec le *Hubble Space Telescope* (NICMOS) (qui seront proposées par notre collaborateur Farhad Yusef-Zadeh de la Northwestern University) pour mesurer à nouveau des sursauts en X et IR. Nous proposerons aussi des observations INTEGRAL coordonnées avec ce programme multi longueurs d'onde, même si (comme discuté en chapitre 4) l'émission X dur d'INTEGRAL centrée sur Sgr A n'est probablement pas liée directement au trou noir massif et à ses sursauts.

Par contre, elle pourrait être associée à la source au TeV observée avec HESS. Bien que je ne fasse pas partie de la collaboration HESS, j'ai des liens étroits avec des membres de la collaboration à Saclay, au SAp et au SPP, ainsi que au laboratoire APC de Paris dont je fais désormais partie. Nous prévoyons de poursuivre les travaux de comparaison entre données INTEGRAL et XMM et les

cartes HESS qui seront obtenues prochainement. Cette étude, ainsi qu'une analyse plus profonde des données INTEGRAL de la région du centre galactique que j'entends promouvoir, pourrait nous amener vers des domaines différents mais tout aussi cruciaux que les trous noirs pour la compréhension de notre univers (phénomènes d'accélération de particules, origine des rayons cosmiques, etc.). En tout cas, je m'intéresse maintenant d'une manière globale aux phénomènes non thermiques qui se déroulent dans la région du centre galactique et je m'emploierais donc à étudier aussi les différentes composantes et les objets autour de Sgr A* que nous avons commencé à explorer avec INTEGRAL et qui semblent être des sites de rayonnement non thermique (le SNR Sgr A Est, les nuages moléculaires, la zone d'émission diffuse X dur de la région, etc.).

5.2 Le futur proche : les très hautes énergies

Dans le futur proche, trois autres observatoires à hautes énergies seront mis en fonction. Il s'agit de AGILE, GLAST et HESS2. GLAST (Gamma-ray Large Area Space Laboratory), une mission NASA avec la participation d'autres pays, dont la France, transportera le LAT (Large Area Telescope) qui permettra d'explorer le domaine des rayons gamma entre 20 MeV et 100 GeV. Sa résolution angulaire qui varie (en σ) entre 3° (100 MeV) et $0,1^\circ$ (10 GeV) est bien meilleure que celle de EGRET/CGRO. GLAST pourra finalement élucider le mystère de la source EGRET au centre galactique et faire éventuellement le lien entre l'émission vue par INTEGRAL et celle vue par HESS.

Cet instrument pourrait aussi donner une contribution importante à l'étude des trous noirs stellaires dans les binaires car, avec sa sensibilité dans la région des 20-50 MeV, il sera en mesure de détecter, ou poser de limites supérieures contraignantes à l'émission de haute énergie vue par CGRO et INTEGRAL. En Fig. 3.3 montre la sensibilité prévue de GLAST confrontée au spectre de Cyg X-1 dans ses deux états et comparée aux limites supérieures d'EGRET. Si le spectre de Cyg X-1 s'étend dans la région de quelques dizaines de MeV, il pourrait être détecté par GLAST en $\sim 4 \cdot 10^5$ s d'observation. Le lancement de GLAST est prévu en 2007. Un peu avant, AGILE, une version réduite de GLAST, sera mis en orbite dans le cadre du programme national italien. Là encore bien que n'étant pas directement liée à ces projets, je compte collaborer avec les scientifiques impliqués dans ces missions pour envisager une participation à l'interprétation scientifique des données.

Un développement important dans les hautes énergies sera la mise en fonction de HESS 2, une extension de HESS avec un nouveau télescope (en plus des quatre qui forment à présent l'observatoire HESS), et permettra de réduire le seuil en énergie en dessous de 100 GeV.

L'ouverture de nouvelles fenêtres de fréquence amène toujours beaucoup de surprises et certainement les trous noirs en feront partie. A travers des collaborations internationales et nationales je participerais à ces nouvelles expériences à haute énergie avec l'étude des données INTEGRAL qui concernent les nombreuses sources au GeV et au TeV qui seront découvertes par ces nouveaux programmes. En particulier, mes travaux sur le centre galactique m'ont permis d'aborder un domaine nouveau (pour moi), celui des trous noirs supermassifs dans les noyaux actifs de galaxies. Je commence à participer à des programmes sur ce type de sources, qui seront aussi des cibles privilégiées de la prochaine mission de haute énergie que nous préparons pour un futur moins proche : SIMBOL-X.

5.3 Le futur accessible : focaliser les rayons X durs

La mission INTEGRAL a été prolongée jusqu'à 2010, mais quelles sont les perspectives à plus long terme dans le domaine des X durs et des gamma mous ? Quelles nouvelles missions d'astronomie spatiale à haute énergie faut-il envisager ?

5.3.1 L'avenir des instruments à masques codés

La technique des masques codés a révolutionné le domaine des hautes énergies et a dominé l'imagerie à haute énergie dans les années 1990 et surtout 2000. Le télescope INTEGRAL/IBIS avec la camera ISGRI a permis de détecter plus de 200 sources dans la bande entre 20 et 100 keV avec des précisions de localisation souvent meilleures que $1'-2'$. Les performances d'INTEGRAL ont déjà permis d'obtenir des résultats exceptionnels, par exemple de dévoiler le mystère de l'émission X dure diffuse de la Galaxie qui a été résolue en quasi totalité en sources ponctuelles (Lebrun et al. 2004). Le spectromètre SPI à masque codé a dessiné la carte de l'émission diffuse à 511 keV, due à l'annihilation électron – positon du bulbe galactique (Knödlseider et al. 2005) ou celle de l'aluminium - 26 (Diehl et al. 2006).

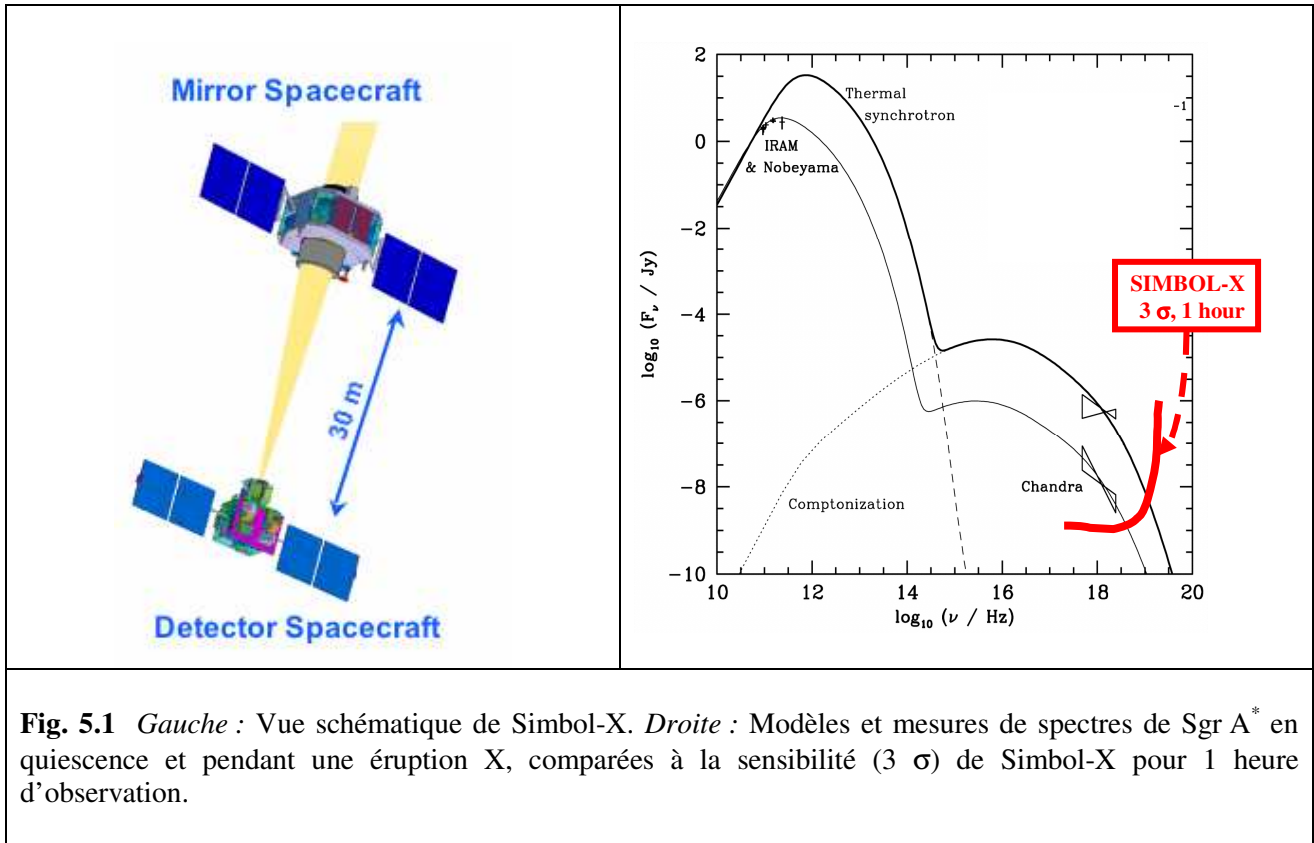
Je suis fier d'avoir participé très activement au développement de cette technique d'imagerie. Ce fut un véritable défi : dans les années 1980 bien peu de chercheurs pensaient que cette technique serait couronnée de succès. Même au centre scientifique des données INTEGRAL, je me suis mesuré souvent à l'incrédulité des collaborateurs quant à la possibilité (et à la manière) de développer un système de logiciels capable d'extraire de véritables images, spectres et courbes de lumière à partir de photons « modulés » par un masque. Mais j'ai eu la satisfaction de constater que la technique des masques codés a été employée dans presque toutes les expériences X durs / gamma mous de la fin du XX^{ème} et début du XXI^{ème} siècle (XRT-TTM/MIR, SIGMA/GRANAT, WFC/SAX, INTEGRAL, BAT/SWIFT, SuperAgile/AGILE). Par exemple, la nouvelle mission de la NASA, SWIFT, met en œuvre une vaste ouverture codée pour le télescope BAT, afin de rechercher et localiser rapidement les sursauts gamma.

Cette technique ne peut cependant pas raisonnablement être employée pour augmenter d'une manière significative (plusieurs ordres de grandeur) la sensibilité des télescopes par rapport à ceux qui opèrent déjà à bord d'INTEGRAL et de SWIFT. Elle sera à nouveau utilisée pour une mission ciblée dans le domaine de l'astrophysique des sursauts gamma (la mission ECLAIRs) car les masques codés permettent des grands champs de vue (avec des résolutions angulaires raisonnables). Par contre, pour obtenir des télescopes bien plus sensibles dans les bandes X dur gamma, il faudrait augmenter les surfaces de détection d'un facteur énorme (la sensibilité est proportionnelle à la racine carrée de l'area sensible). INTEGRAL, qu'est déjà un satellite de ~ 4-5 tonnes, est probablement la dernière grande mission basée sur ce concept, car en définitive, l'imagerie par ouverture codée reste basée sur la modulation et non pas sur la focalisation du rayonnement.

Le rêve d'un astronome des hautes énergies est, bien sûr, de pouvoir effectivement focaliser le rayonnement de haute énergie. Une application possible est la lentille gamma, basée sur le concept de la diffraction de Laue. L'autre possibilité, plus attrayante, est d'étendre la technique de réflexion à incidence rasante au domaine des hautes énergies en augmentant la focale des télescopes X.

5.3.2 SIMBOL-X

La publication intitulée **SIMBOL-X, a formation flying-mission for hard X-ray astrophysics** (Ferrando et al. 2005, publication n°. 13) (voir aussi Ferrando et al. 2004a) présente la mission à laquelle je travaille actuellement et que je considère comme un point clef des programmes futurs à haute énergie. Le projet SIMBOL-X prévoit la mise en orbite en 2013 d'un télescope à haute énergie de nouvelle génération, couvrant une gamme s'étendant de 0,5 à 70 keV en utilisant un dispositif de focalisation par réflexion à incidence rasante (avec miroirs paraboliques et hyperboliques emboîtés de type Wolter I) réservé jusqu'alors aux rayons X de moins de 10 keV. Ceci est réalisé grâce à l'emploi d'un télescope à très longue focale s'appuyant sur deux satellites évoluant en formation, à ~ 30 m l'un de l'autre. SIMBOL-X affiche un gain de 2-3 ordres de grandeur en sensibilité et en résolution angulaire par rapport aux instrumentations actuelles dans la bande des X durs (voir la table des performances attendues de SIMBOL-X en section 3.3 de la publication n°. 13).



Je présente en Fig. 5.1 le schéma du télescope. Avec un miroir sur un satellite et le plan détecteur sur l'autre, les rayons X, focalisés sur un plan de détection fait de deux détecteurs (l'un composé de Cd(Zn)Te pour les énergies de 14 à 70 keV, l'autre d'un semi-conducteur de silicium pour la bande inférieure) verrons le faces des miroir avec un angle très faible. Puisque l'énergie maximum des photons focalisés dépend de l'inverse de l'angle d'incidence, la possibilité de placer les deux éléments à grande distance l'un de l'autre permet d'augmenter la seuil en énergie des photons détectés. Avec ce dispositif (couplé à une technologie de pointe pour les détecteurs X) on obtient des performances proches de celles de XMM-Newton, mais sur une bande d'énergie qui arrive jusqu'à 70 keV. Une possibilité qui est à l'étude en ce moment est celle de doter SIMBOL-X de miroirs multicouches, les surfaces étant recouvertes de couches de matériaux différents (Pt/C). Cela permettrait d'étendre vers des énergies encore plus hautes (~ 100 keV) le domaine d'énergie de l'instrument.

Le potentiel de SIMBOL-X peut être apprécié en considérant le cas du centre galactique (Ferrando et al. 2004b). La Fig. 4.11 (chapitre 4), qui compare les cartes de la région du centre galactique obtenues respectivement par XMM-Newton dans le domaine des X et par INTEGRAL/IBIS/ISGRI dans le domaine des X durs, nous donne exactement le progrès que l'astronomie des X durs fera grâce à SIMBOL-X, car il pourra obtenir un image avec la même finesse que celle de XMM-Newton dans le domaine 1-100 keV. La carte INTEGRAL est la meilleure disponible aujourd'hui dans la bande 20-40 keV et sa finesse ne pourra pas être améliorée significativement, car INTEGRAL a une résolution angulaire de $12'$. En Fig. 5.1 (droite) je compare la sensibilité de SIMBOL-X (1 heure d'observation) avec les éruptions vues par XMM-Newton. On pourra mesurer la forme du spectre au delà de 10 keV et donc, en principe, distinguer les modèles d'émission et déterminer l'énergie maximale des particules qui donnent lieu à l'émission. Avec une telle sensibilité, il sera possible de détailler les variations temporelles sur des échelles de temps de 20 à 30 mn. Là encore la mesure des quasi-périodicités, sur des échelles de temps typiques de la dernière orbite stable sera possible et permettra (si les QPO sont liées aux fréquences d'oscillations autour d'un trou noir) la mesure du spin et de la masse du trou noir. De surcroît SIMBOL-X résoudra le mystère de l'émission diffuse X (thermique et non thermique) et permettra de comprendre l'origine de la source INTEGRAL du centre galactique.

Ma contribution principale à ce projet sera de superviser la réalisation du segment sol scientifique de la mission. Dans ce contexte mon expérience, acquise dans le développement des analyses des

données du projet SIGMA/GRANAT et surtout dans la participation à la réalisation du centre de données scientifique d'INTEGRAL, sera particulièrement utile dans ce contexte.

La mission a été présentée pour une sélection en réponse à un appel d'offre du CNES. Le projet (PI : Philippe Ferrando) a été approuvé d'abord pour une phase 0 d'étude et puis est passé en janvier 2006 en phase A. La mission se configure en partenariat avec l'agence spatiale italienne (l'observatoire de Brera est en charge du développement des miroirs) et avec une participation allemande (le plan détecteur basse énergie). SIMBOL-X permettra une nouvelle révolution dans l'astronomie des rayons X durs qui nous ouvrira la porte de la compréhension des phénomènes non thermiques de l'univers.

5.3.3 Projets à plus longue échelle

Dans le cadre de la recherche des trous noirs, on ne peut pas oublier d'autres projets en vue, notamment ceux liés aux programmes scientifiques de l'ESA. Le premier est la mission ESA/NASA pour la recherche d'ondes gravitationnelles par le moyen de l'interférométrie laser. Le projet LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) prévoit la mise en orbite (vers 2015) de trois satellites placés à plusieurs millions de km l'un de l'autre et censés mesurer le passage d'ondes gravitationnelles. Avec LISA, on espère étudier les trous noirs en coalescence et la chute d'étoiles compactes dans les trous noirs supermassifs. Un autre projet évoqué dans le cadre du programme *Cosmic Vision* de l'ESA est la mission d'astronomie X, XEUS.

5.4 Conclusions : l'astroparticule, l'université et l'Europe

Mon projet n'est pas seulement constitué de programmes d'observation et de projets de missions spatiales. Je souhaite aussi une évolution plus générale de mes orientations d'astrophysicien avec l'exigence de me rapprocher des chercheurs de ce domaine que l'on appelle « astroparticule ». C'est dans ce cadre que j'ai adhéré depuis quelques années à la Fédération de Recherche AstroParticule et Cosmologie (APC) qui est devenue en 2005 une Unité Mixte de Recherche (Université Paris 7, CNRS, CEA, Observatoire de Paris).

Outre un rapprochement intéressant avec le monde universitaire, cette ouverture peut représenter pour moi, mais aussi pour les étudiants et les chercheurs que j'encadre, une opportunité d'élargir

leur compétences et leur champ d'action dans un domaine plus proche de la physique des particules, de la matière noire et de la cosmologie, et de donner ainsi un nouvel élan à l'astrophysique des hautes énergies que nous pratiquons. Vu les résultats récents (XMM, INTEGRAL, HESS, Auger) et les programmes futurs (GLAST, Agile, HESS2, SIMBOL-X, LISA) l'astroparticule est sans doute en bonne santé et extrêmement dynamique. Je considère donc que ce rapprochement est une évolution intéressante qui renforcera le programme d'astrophysique des hautes énergies que nous souhaitons développer (SIMBOL-X). En considérant les succès de SIGMA, INTEGRAL, HESS (et encore avant COS B), l'Europe peut se vanter d'être compétitive par rapport aux Etats Unis en astronomie des rayons X durs et gamma et elle doit maintenir cette position avec dynamisme et compétitivité. Le rassemblement des forces dans la mouvance *astroparticule* va sûrement dans ce sens.

Je me considère d'ailleurs membre depuis toujours de cette communauté. Je ne suis pas arrivé à l'astrophysique comme astronome amateur, mais plutôt en étant fasciné par les cours de physique moderne et des rayons cosmiques suivis à l'université de Milan, dans la grande tradition de Giuseppe Occhialini, visionnaire de l'astroparticule, l'un des pères fondateurs de l'Agence Spatiale Européenne.

Bibliographie

- Diehl R., 2006, *Nat*, 439, 45
Ferrando, P., et al. 2004a, *SPIE Conf. Proc.*, 5168, 65 [C80]
Ferrando, P., et al. 2004b, *Conf. Proc. of the SF2A*, EDP-Sciences C. S., 403 [C83]
Ferrando, P., et al. 2005, *SPIE Conf. Proc.*, 5900, 195 [C104] (**Publication n° 13**)
Lebrun, F., et al., *Nat*, 428, L293 [A80]
Knödlseder J., et al., 2005, *A&A*, 441, 513

Publications présentées

Projet de recherche et perspectives (VIII-5)

- 13 SIMBOL-X, a formation flying-mission for hard X-ray astrophysics**
P. Ferrando, A. Goldwurm, P. Laurent O. Limousin, J. Martignac, F. Pinsard,
Y. Rio, J.P. Roques, O. Citterio, G. Pareschi, G. Tagliaferri, F. Fiore, G.
Malaguti, U. Briel, G. Hasinger, L. Strueder,
2005, Conf. Proc. SPIE *"Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy
II"*, San Diego July 31st-Aug.4th, 2005, Vol.5900, p. 195, astro-ph/0508674

SIMBOL–X

a formation flying mission for hard X-rays astrophysics

P. Ferrando^{*a}, A. Goldwurm^a, P. Laurent^a, O. Limousin^b, J. Martignac^b, F. Pinsard^b,
Y. Rio^b, J.P. Roques^c, O. Citterio^d, G. Pareschi^d, G. Tagliaferri^d, F. Fiore^e,
G. Malaguti^f, U. Briel^g, G. Hasinger^g, L. Strüder^g
On behalf of the Simbol–X collaboration

^a UMR 7164, APC & DSM/DAPNIA/Service d’Astrophysique, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

^b DSM/DAPNIA/Service d’Astrophysique, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

^c Centre d’Etude Spatiale des Rayonnements, BP 4346, 31028 Toulouse Cedex, France

^d INAF, Osservatorio Astronomico di Brera, via E. Bianchi 46, 23807 Merate, Italy

^e INAF, Osservatorio Astronomico di Roma, via E. Frascati 33, 00040 Monteporzio, Italy

^f INAF, Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica, Sezione di Bologna, via P. Gobetti 101, 40129 Bologna, Italy

^g Max Planck Institut für Extraterrestrische Physik, 85748 Garching, Germany

ABSTRACT

SIMBOL-X is a hard X-ray mission, operating in the $\sim 0.5\text{--}70$ keV range, which is proposed by a consortium of European laboratories in response to the 2004 call for ideas of CNES for a scientific mission to be flown on a formation flying demonstrator. Relying on two spacecrafts in a formation flying configuration, SIMBOL–X uses for the first time a ~ 30 m focal length X-ray mirror to focus X-rays with energy above 10 keV, resulting in a two orders of magnitude improvement in angular resolution and sensitivity in the hard X-ray range with respect to non focusing techniques. The SIMBOL–X revolutionary instrumental capabilities will allow to elucidate outstanding questions in high energy astrophysics, related in particular to the physics of accretion onto compact objects, to the acceleration of particles to the highest energies, and to the nature of the Cosmic X-Ray background. The mission, which has gone through a thorough assessment study performed by CNES, is expected to start a competitive phase A in autumn 2005, leading to a flight decision at the end of 2006, for a launch in 2012. The mission science objectives, the current status of the instrumentation and mission design, as well as potential trade-offs are presented in this paper.

Keywords: X-ray telescopes, X-ray detectors, formation flying

1. SCIENTIFIC AND PROGRAMMATIC CONTEXTS

The non thermal emissions in the X and gamma-ray domains reveal dynamical processes which involve very large transfers of matter and energy in a variety of astrophysical objects, at all scales from stars to clusters of galaxies. They therefore play a major role in the evolution of these objects as well as that of the Universe as a whole. Moreover, these processes occur in environments with extreme physical conditions in terms of gravity, pressure, density, or magnetic field, so that their study gives a unique opportunity to test the laws of physics well beyond the parameter space available in the laboratories. For these reasons the study of high energy phenomena is a major goal of modern astrophysics, currently addressed by a number of space missions, especially the large observatories, as XMM–Newton and Chandra in X-rays, and INTEGRAL in gamma-rays.

^{*} Further author information: send correspondence to Philippe Ferrando, e-mail: philippe.ferrando@cea.fr

There is however a very large gap in spatial resolution and sensitivity between the X and gamma-ray domains. Below ~ 10 keV, astrophysics missions are using X-ray mirrors based on grazing incidence reflection properties. This allows to achieve an extremely good angular resolution, down to 0.5 arcsec for Chandra, and a good signal to noise thanks to the focusing of the X-rays onto a small detector surface. This technique has so far been limited to energies below ~ 10 keV because of the maximum focal length that can fit in a single spacecraft. Hard X-ray and gamma-ray imaging instruments are thus using a different technique, that of coded masks. This non-focusing technique has intrinsically a much lower signal to noise ratio than that of a focusing instrument, and does not allow to reach angular resolutions better than a few arc minutes. In addition to the difference in angular resolution, there is also roughly two orders of magnitude of difference in point source sensitivity between X-ray and gamma-ray telescopes.

This transition of techniques unfortunately happens roughly at the energy above which the identification of a non-thermal component is unambiguous with respect to thermal emission. Considered from the low energy side, this obviously strongly limits the interpretation of the high quality X-ray measurements, and particularly that related to the acceleration of particles. Considered from the high energy side, this renders impossible the mapping of the gamma-ray emission of extended sources to the scales needed to understand the emission mechanisms by comparing with lower energy data, and this limits the studies to very bright sources only.

A clear requirement for future high energy astrophysics missions is now to bridge this gap of sensitivity, by offering an instrumentation in the hard X-ray range with a sensitivity and angular resolution similar to that of the current X-ray telescopes. In order to do this, a hard X-ray focusing optics is needed. Such an optics can readily be implemented by a simple extension of the current X-ray mirror technology to long focal lengths, which is the basic concept of the Simbol-X mission.

At the same time, there is now the emerging technical possibility to design missions using multiple spacecrafts flying in a constrained formation. At the beginning of 2004, the CNES space agency has issued a call for proposal of a scientific payload to be flown on a formation flight demonstrator mission to be launched at the beginning of the next decade. The Simbol-X mission has been proposed to CNES in this context, and has been selected for further mission implementation studies.

Simbol-X is a hard X-ray pointed telescope, based on a very long focal length optics (30 m in nominal design) which will extend the focusing technics to energies up to at least ~ 70 keV, offering a gain of roughly two orders of magnitude in sensitivity and angular resolution compared to the current instruments above 10 keV. In addition to this fundamental breakthrough in the hard X-rays, Simbol-X will have a low energy threshold around ~ 0.5 –1 keV, which will allow to fully cover the transition from thermal to non-thermal emissions, as well as the Iron line region, two important characteristics for the study of the highly variable accreting sources which are prime scientific targets of this mission.

Simbol-X has undergone a thorough assessment study (called “phase 0”) performed by a dedicated CNES engineering team (PASO) in the beginning of 2005. This study, which has covered all the aspects of the mission from payload to ground segment, has demonstrated that the Simbol-X payload and mission implementation fit well within the constraints of the call for proposal issued by CNES.

An extensive description of Simbol-X has already been given by Ferrando *et al.*¹, with a first payload design and a possible mission implementation (also issued from an earlier CNES study). The basics of the mission remain the same, and will be only concisely repeated here. We will concentrate more on the important changes since that paper, both on the payload and on the mission implementation.

2. SCIENTIFIC OBJECTIVES

Offering “soft X-ray”-like angular resolution and sensitivity in the hard X-ray range, SIMBOL-X will provide a dramatic improvement for investigating a number of fundamental problems in astrophysics, which have their essential signatures in non thermal emissions. The recent measurements made by the IBIS/ISGRI instrument onboard INTEGRAL have unveiled even further the richness of the hard X-ray domain, in particular by discovering numerous highly absorbed sources, the nature of which remains a puzzle². The list of detailed topics and subjects that Simbol-X can

address is very large, and cannot be detailed here. We simply mention below the three main scientific questions in which Simbol-X will make a breakthrough. More information and discussions, as well as detailed simulations of observations in the nominal design, can be found in paper I.

The first scientific question that Simbol-X will address is the dynamics of matter around compact objects, and in particular Black Holes. By providing the most extreme gravitational conditions under which matter can be presently observed, the Black Hole environment is a unique laboratory to test laws of physics. If it is generally admitted that the accretion of matter onto these objects occurs via a very dynamic accretion disk, the way that this disk evolves, the mechanisms that form the often observed relativistic jets, as well as the origin of the high energy radiation remain unclear. Finding the origin of the observed emission, between e.g. synchrotron in a jet, Compton from a hot corona, or reflection from the disk, and identifying the geometry of the system necessitates accurate measurements of the non thermal spectrum together with that of the Iron line shape. Simbol-X will allow such measurements on Black Holes of all masses in up to now uncharted regimes or locations.

For Galactic Black Holes of stellar mass in binary systems, these include spectral measurements in all states of accretion, and for the first time in the elusive quiescent state. A very large sample of binary systems in nearby Galaxies, up to ~ 3 Mpc, will also be measured for the first time in hard X-rays, providing absolute luminosities for these systems, and allowing population studies for other galaxies than ours. Going to higher mass systems, Simbol-X will be able to observe and resolve for the first time Ultra Luminous X-ray sources above 10 keV. This is a key ingredient to understand the nature of these sources, which are suspected to harbour an intermediate mass black hole, but which might be of a more classical nature, like e.g. QSOs. At the end of the black hole mass scale, Simbol-X will provide very detailed spectra for a very large sample of AGNs on their dynamic time scale (a few ks). As for binary systems, this will allow to disentangle the different possible emitting components, to understand the geometry of the systems, and measure the Black Hole spin via the Fe line shape. Moreover, Simbol-X will allow a true population study for the high energy emission of obscured AGNs, which are playing a key role in X-ray background synthesis models. Today, only a handful of them are known. Statistically, Simbol-X will increase by a factor of more than 100 the volume of Universe in which AGNs can be studied at high energy. Finally, but not least, Simbol-X will give a definitive measurement of the high energy emission of the supermassive black hole at the centre of our Galaxy, SgrA*, which is still unknown despite deep INTEGRAL observations³. The understanding of this object and its relations with its surroundings, as well as the origin of the puzzling high energy diffuse emission in the centre of the Milky Way, is crucial for understanding the much farther away galactic cores.

The second main scientific question that Simbol-X will address is that of the acceleration of particles in the Universe, in relation with the still unsolved problem of the origin of the cosmic-rays, particularly of the acceleration sites for the highest energies.

For that purpose, Simbol-X will observe acceleration in supernova remnants, for which the non thermal emission arises from electrons of tens of TeV energies. Measuring the synchrotron spectrum into the hard X-rays will allow to determine the maximum energy of the accelerated electrons, and will give unique insights in the mechanism responsible for the limitation in energy. In addition, Simbol-X will also map the supernova remnants, and correlate these data with radio, and now available TeV gamma-rays data from HESS (e.g. Aharonian *et al.*⁴). Putting these together will unambiguously allow to disentangle the different components, in particular the expected but not yet firmly identified hadronic one. Simbol-X will also observe other known sites of particle acceleration, like in particular extended X-ray jets of AGNs, as e.g. those of Cen A and Pictor A, which above 10 keV cannot be separated today from the bright emission of the accreting object. This is crucial to understand the emission mechanisms at work in these jets (synchrotron, inverse Compton), and to measure the maximum energy of the accelerated electrons.

The third major scientific question that will be addressed with Simbol-X is that of the structure of the Universe and of its evolution. Key observables are clusters of Galaxies, for which Simbol-X will definitely measure the controversial presence of a non thermal component, and the diffuse Cosmic X-Ray Background (CXRB). The CXRB is the most direct probe of accretion activity onto super-massive black holes, and determining its origin gives major constraints for the formation and evolution of structures in the Universe. If the major fraction of the CXRB has been resolved into discrete sources below ~ 7 keV, only half of it has been accounted for in the 7–10 keV band, and essentially nothing is directly known above 10 keV, and in particular in the 30–50 keV band in which the CXRB spectrum is peaking. Observational and theoretical evidences based on soft X-Rays deep fields have led to the conclusion that a significant

fraction of the CXRB is due to obscured Compton thick sources. However, such a conclusion remains unconstrained by the available observations, and a major breakthrough is needed to validate the CXRB synthesis models and to assess the values of their parameters, such as the space density and evolution of these obscured sources. With about a $1 \mu\text{Crab}$ flux sensitivity in the 20–40 keV band, Simbol–X will have the necessary power to detect these Compton thick sources and resolve between 35 and 65 % of the CXRB in the energy range where it peaks, thus providing a true quantum leap forward for the understanding of this fundamental component of the Universe.

3. MISSION CONCEPT AND CHARACTERISTICS

Simbol–X is basically built using a classical Wolter I optics focusing X–rays onto a focal plane detector system. The gain in maximum energy is achieved by having a long focal length, of 30 metres in the nominal design studied so far, i.e. 4 times that of XMM–Newton mirrors. Since this cannot fit in a single spacecraft, the mirror and detectors will be flown on two separate spacecrafts in a formation flying configuration, as explained in paper I and sketched on Figure 1.

Simbol–X is a pointed telescope, which is nominally required to be able perform very long uninterrupted observations (100 ks or more) on the same target. The necessity to have a stable image quality, as well as to keep the full field of view inside the detector area, dictate the requirements on the formation flying stability. The constraint is that the distance between the two spacecrafts (along the telescope axis) must be kept at the focal length value within about ± 10 cm, whereas the intersection of the telescope axis must be at the centre of the focal plane within about ± 20 arcsec. It is also required that the arrival direction of each detected photon can be reconstructed to ± 1.5 arcsec, which imposes a knowledge (monitoring) of the relative positions of the two spacecrafts to that level of accuracy.

Compared to the design and performances described in paper I, several evolutions have taken place or will be considered in the phase A study. The first is the possibility of improving the Simbol–X performances by modification of the optics from the nominal design. The second is a careful investigation of the baffling issue against the diffuse X–ray sky background. The last one is on the spacecrafts design and mission implementation. They are described with some details below, while the reader is referred to paper I for a more extensive description of the “basics” of the payload and mission.

3.1 Optics

The Simbol–X optics is a Wolter I nested shells mirror. These shells will be made following the Nickel electroforming replication method⁵, for which the Brera Observatory and its associated industrial partners have acquired a large experience through the building of the BeppoSAX, SWIFT, and XMM–Newton mirrors. The long focal length coupled to the requirement to have a large filling factor lead to a total number of shells of about 100. Compared to the XMM–Newton

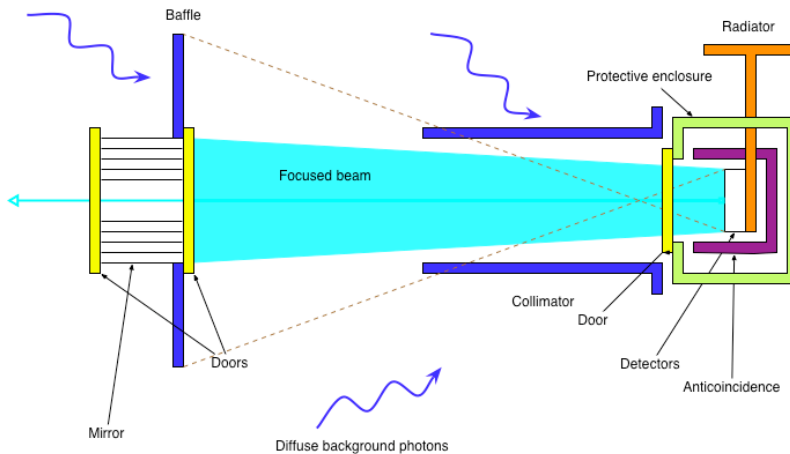


Figure 1 : Sketch of the SIMBOL–X configuration. The mirror, on the left, is carried by one spacecraft, while the detector system and the collimator, on the right, are carried by a second spacecraft. The figure emphasizes the issue of the diffuse sky background, discussed in Section 3.4, and is therefore not to scale. Typical sizes for a 30 m focal length (distance between the two spacecrafts) are 3 m for the baffle diameter, 1.5 m for the collimator length and 10 cm for its diameter.

mirror case, the thickness to diameter ratio for the shells will be reduced so that the mass of the mirror stay within the mission constraints. At the current level of overall design of the mission, the mass mirror allocation is about 300 kg. With such a mass, and for this number of shells, the angular resolution will be no worse than 30 arcsec (FWHM) as experimentally proven⁶. The goal for angular resolution is to reach 15 arcsec, which might necessitate a trade-off with the effective area. This will be considered in the phase A study.

The nominal coating considered in paper I is made of a conventional single layer of Pt. The optics properties then entirely rely on the total reflection phenomenon, which is characterized by a very large reflectivity at grazing angles until a critical angle beyond which the reflectivity falls rapidly down to almost zero. Beyond 10 keV the useful angles for reflection become very small, determining, as a consequence, a strong limitation of the available collecting area for optics with usual focal lengths (≤ 10 m). This problem is solved with the possibility of having very long focal lengths as offered by the formation flight technology. Large collecting areas can then be obtained at several tens keV with a conventional single layer coating. This is the baseline given in paper I, with a 30 m focal length. The effective area for this single layer baseline is plotted as the dashed curve in Figure 2a.

Besides this baseline design, we are now considering replacing the single Pt layer coating by a multi-layer Pt/C coating, while still remaining compliant with the mission constraints. The description and optimization of the multi-layer reflectors can be found in Cotroneo & Pareschi⁷. There are two advantages in using a multi-layer coating. The first one is to increase very significantly the energy range up to 80 keV and above. This will allow to effectively cover the region of the ⁴⁴Sc lines (68 keV and 78 keV) resulting from the decay of ⁴⁴Ti, an objective of prime importance for the astrophysics of supernovae explosion. The second one is to increase the field of view, provided that the focal length is decreased. This would obviously reduce the time necessary to map extended objects, and increase the statistics of the discovery of highly obscured sources per observation. Examples of what can be achieved are shown in Figure 2a and 2b, for two extreme cases.

In Fig. 2a a simple replacement of the single layer Pt coating by a multi-layer has been simulated, while keeping the same geometry and number of shells. There is a very important gain of effective area, which is still over 30 cm² beyond 80 keV. There is also a slight gain in the field of view, which increases from 6 to 7 arcmin (diameter for 50 % vignetting) with the multi-layer option.

In Fig. 2b, two different geometric configurations are considered; one is the same as in Fig. 2a (30 m focal length, 60 cm outer diameter), while the other one assumes for the outer diameter the maximum value possible to build with existing facilities, as well as a shorter focal length of 20 m. This last option has the advantage of increasing very significantly the field of view up to 12 arcmin, as well as the effective area below ~ 25 keV, but the drawback of having much less effective area above 30 keV, which falls essentially to zero at the Pt K edge at 78.4 keV.

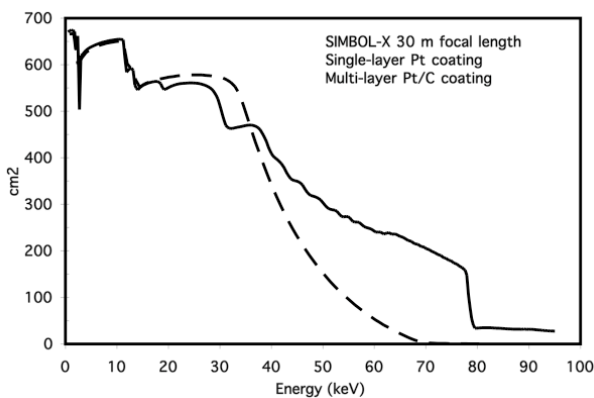


Figure 2a : Mirror effective area of the 60 cm diameter mirror, with a single-layer Pt coating (dashed line), and with a multi-layer coating (full line).

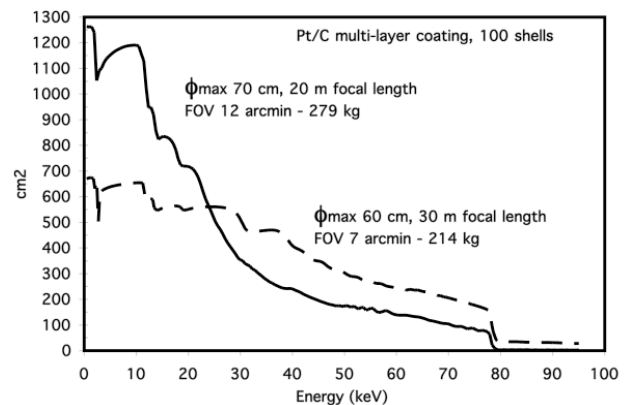


Figure 2b : Mirror effective area for two extreme cases. Both are assuming a multi-layer coating. The dashed line is the same as in Fig. 2a (note the difference of scale). The full line is assuming a larger outer diameter, and a shorter focal length.

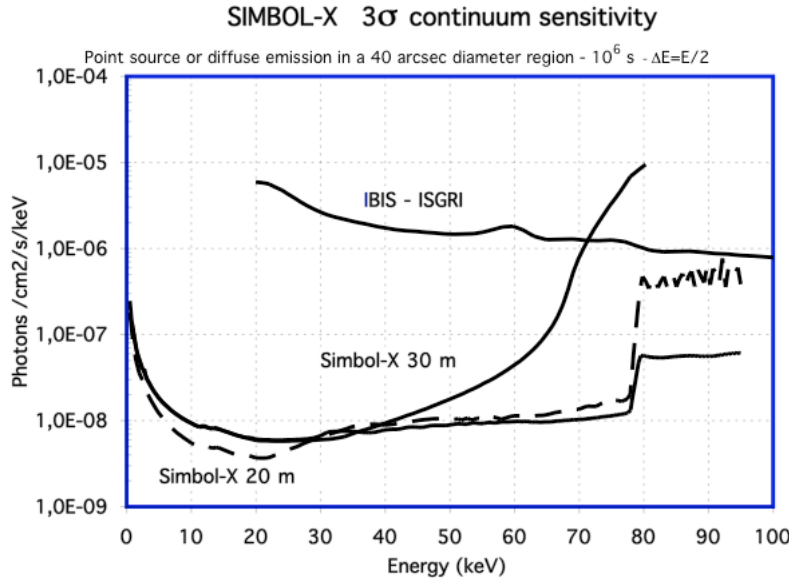


Figure 3 : continuum sensitivity of Simbol-X, for the three different options of optics corresponding to Fig. 2. The sensitivity is calculated with the same internal background assumptions as in paper I, i.e. about $7 \cdot 10^{-5}$ cts/cm²/keV. The sensitivity is calculated for 1 Ms of observation, for a better comparison with INTEGRAL, and $\Delta E = E/2$. The two Simbol-X full line curves correspond to the 30 m focal length with single Pt layer coating and multi-layer coating respectively. The dashed curve is the for the 20 m focal length case, with multi-layer coating.

These two extreme cases illustrate the range of performances that can be expected for the final design. This will be optimized for the best trade-off between effective area and field of view with the respect to the different science objectives, taking also into account the formation flying constraints.

On the other hand Figure 3 displays the Simbol-X sensitivity to the detection of point sources, for the three optics cases described above, assuming a 40 arcsec extraction region which contains 90 % of the source photons. It is interesting to see that the two multi-layer options have in fact a very similar sensitivity up to the Pt K edge, despite their different effective area. The reason is that, compared to the 30 m focal length case, the smallest effective area of the 20 m focal length case is compensated by the fact that the background in the extraction zone is also smaller because of the smaller plate scale. On this figure has also been plotted the IBIS/ISGRI sensitivity to point sources, for the same observation parameters. One can readily see that more than two orders of magnitude are gained by Simbol-X, up to about 50 keV in the single layer Pt coating case, and about 80 keV if a multi-layer coating is assumed.

3.2 Thermics and low energy threshold

Even if Simbol-X is designed for non-thermal hard X-ray astrophysics goals, it is desirable to have the lowest energy threshold possible. This is in particular the case for all variable objects for which a measurement of the thermal component contemporary to the non-thermal one is necessary, in order to gain access to parameters like for example the absorption column or the disk temperature in binary systems. In order to do so, there should be the less possible material in the path of the X-rays.

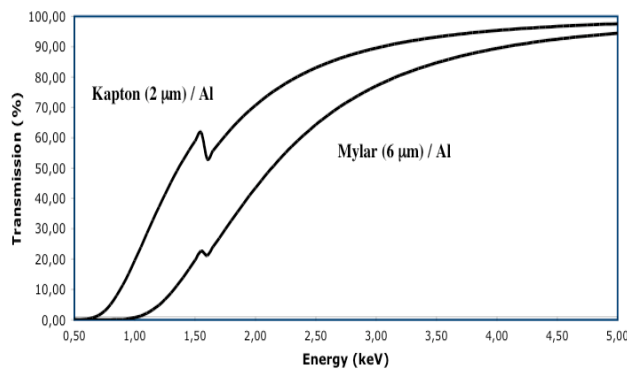


Figure 4 : Overall transmission of filter foils, in two different cases. The Aluminum thickness is 1000 Angströms

Ideally this means in particular that the mirror shells should be fully open to the outer space, like they are on Chandra or XMM-Newton. This situation is however very demanding for the thermal control and stresses on the mirror module, especially since in the case of the formation flying configuration both sides of the mirror are open to space. In order to minimize these thermal loads, it is anticipated to cover each side of the mirror by a thin aluminized foil. On Figure 4 are shown for example the transmissions resulting from the coverage of each mirror

side by a single aluminized foil supported by different material. One case is for 6 μm thick Mylar, the other case for or a 2 μm thick Kapton. For a threshold definition at 20 % of transmission, this gives an energy threshold of ~ 1.5 and 1.0 keV respectively. Such thicknesses are in fact rather large, and foils with sub-micron support can be manufactured and have been flown⁸; minimizing the thickness given the mechanical constraints will be performed in phase A, but it is already anticipated that the low energy threshold will be between 0.5 and 1 keV at most. Such foils would moreover have the advantage of providing the blocking of the optical light.

3.3 Telescope characteristics

The table below summarizes the characteristics of Simbol-X discussed in the previous sections. The left column is the baseline design similar to that of paper I. The right column indicates the areas where an improvement can be made by the use of a multi-layer coating, which will be studied in phase A. In addition to the parameters already discussed, the requirement on the energy resolution for the hard X-rays will depend on the option. The only lines necessitating an important energy resolution are those linked to the ^{44}Ti decay, which are just above the limit of detection of current instruments like INTEGRAL. Simbol-X will not do better in the single layer case, so that a relatively moderate energy resolution is sufficient. In the multi-layer case, Simbol-X has definitely the power to measure the lines profiles, at least in the known case of CasA, which explains why the requirement on energy resolution is more stringent.

Parameter	Baseline (Pt single layer)	Changes with multi-layer
Energy range	$< 1.0 \text{ keV} - 70 \text{ keV}$	$< 1.0 - 100 \text{ keV}$
Energy resolution	$\sim 130 \text{ eV @ } 6 \text{ keV}$ $\sim 2 \text{ keV @ } 60 \text{ keV}$	— $1 \text{ keV @ } 60 \text{ keV}$
Angular resolution	$< 30 \text{ arcsec HEW, goal } 15 \text{ arcsec}$	—
Localisation	$< 3 \text{ arcsec}$	—
Field of View (50 % vignetting)	6 arcmin	7 – 12 arcmin
Effective area	550 cm^2 below 35 keV 2 cm^2 at 70 keV	$550 - 1100 \text{ cm}^2$ below 25 keV 200 cm^2 at 70 keV
Sensitivity (3σ , 1 Ms, $dE/E = E/2$)	$10^{-8} \text{ ph/cm}^2/\text{s/keV}$ for $E < 40 \text{ keV}$	$10^{-8} \text{ ph/cm}^2/\text{s/keV}$ up to 80 keV

3.4 Baffling the sky background

As there is no telescope tube between the mirror and the focal plane unit in a formation flight configuration, there is a need to protect the detectors from seeing X-rays coming from outside of the mirror, which would otherwise generate an unwanted background. When integrated over even a modest solid angle, the Cosmic diffuse X-ray background has indeed a level much larger than what is required to reach the desired sensitivity. As a matter of fact, in the case of a 2π opening of the detectors on the sky, the sensitivity would be reduced by two orders of magnitude, i.e. the gain in

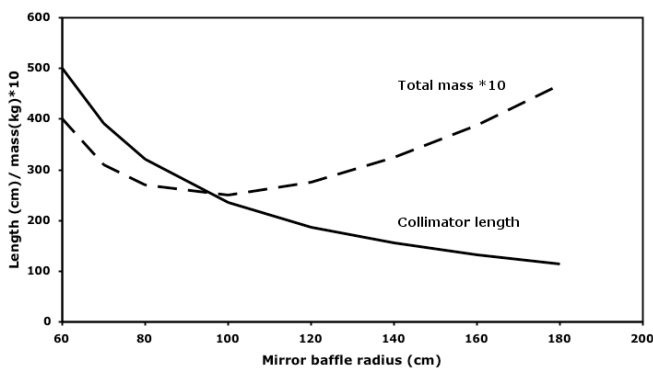


Figure 5 : Length of the collimator, and mass of the total baffling system, as a function of the sky baffle radius.

sensitivity brought by the focusing would be entirely lost. This is discussed also in details by Malaguti *et al.*⁹. For Simbol-X, we have decided to entirely baffle the sky, so that only X-rays focused by the mirror reaches the focal plane unit. In order to do that, we combine a “sky baffle” placed on the mirror spacecraft around the mirror, and a collimator placed on top of the focal plane, as illustrated in Fig. 1. Both the sky baffle and the collimator will be graded shields to stop the highest X-ray background energies and to avoid unwanted fluorescence lines. The Figure 5 displays the length of the collimator needed to entirely shield the diffuse sky, as a function of the size of sky baffle on the mirror spacecraft. As expected, the largest is the sky baffle, the shortest needs to be

the collimator. As we will see, we can accommodate a 3 m diameter sky baffle, so that a ~ 1.5 m collimator is sufficient. The other curve on Figure 5 is the total mass of the baffling system, i.e. that of the collimator added to that of the sky baffle. The mass has been calculated by putting the amount of material needed to decrease the transmitted diffuse background flux below the internal detector background level. Since the solid angle covered by the sky baffle is quite small, the baffle does not need to be as opaque as the collimator which has to suppress a much larger integrated background flux. The mass of the sky baffle remains relatively small even for very large diameters. Overall, we have calculated that the mass of the shielding material is less than 20 kg for the 3 m diameter case. In Figure 5, we have added to this stopping material mass a conservative estimate for an additional structural mass to hold the shielding, leading to an overall mass of about 35 kg for the complete system.

3.5 Focal plane unit

The focal plane is essentially similar to that described in paper I, to which the reader is referred for a detailed description. We simply recall for the sake of completeness the main characteristics of the detector system. The focal plane detector system thus consists in the combination of a low energy detector made of a DEPFET-SDD Active Pixel Sensor, efficient up to ~ 20 keV, on top of a mosaic of high energy Cd(Zn)Te pixelized detector. The two cameras will be surrounded by an active anticoincidence shield. Both detectors are spectro-imagers, and will have a pixel size of ~ 500 μm , which will allow a sufficient over sampling of the mirror point spread function. The two detectors have very fast reading capabilities, and it is envisioned to also use the SDD detector signal in the anticoincidence scheme of the Cd(Zn)Te detector which will then be entirely surrounded by and active anticoincidence shielding.

Detector teams at MPE (DEPFET-SDD low energy detector) and at CEA/DAPNIA (Cd(Zn)Te high energy detector) are currently concentrating on manufacturing and testing prototypes of the low and high energy detection units. On one hand, an 8×8 APS prototype based on the DEPFET-SDD combination with 1×1 mm² pixels has been successfully produced. First tests of this device show very promising results. The results of the similar XEUS DEPMOSFET matrix can be found in Treis *et al.*¹⁰. On the other hand, an 8×8 CdZnTe prototype, 1 mm pitch, equipped with its dedicated full custom read-out ASIC IDeF-X V1.0 has also been successfully implemented. The most recent detector characteristics and ASIC performances will be published respectively in references [11] and [12].

4. MISSION STUDY

As mentioned in Section 1, the Simbol-X mission has been studied by a dedicated engineering team of CNES, the PASO. The goal of this study, so called phase 0, was to fully assess the feasibility of the mission, and its cost, as an input in the selection process of the scientific mission to be flown as a formation flying demonstrator. This study has covered all aspects of the mission and its implementation, going well beyond the initial study made in 2003 to which we referred to in paper I. We simply mention briefly here a few points that have come out from this study, especially those in relation with the scientific operations.

The first point is about the orbit. Given the requirements to observe beyond 75,000 km of altitude to minimize the radiation level, and the envisioned launcher, the most favorable orbit that came out for Simbol-X is a high elliptical orbit, with a perigee of 44,000 km at launch, and an apogee at 253,000 km. This orbit has a period of 7 days, and allows continuous observations for most of the time, and may be all the time if the level of radiation actually encountered close to the (high altitude) perigee is small enough. Moreover, such high altitudes fully minimize the gaz consumption needed for keeping the formation, since the gravity gradient between the two spacecrafts is smaller than the radiation pressure. The telescope axis orientation is constrained to be perpendicular to the Sun to Simbol-X line within ± 20 degrees, which provides a full sky visibility in about 4.5 months.

The orbit can be essentially fully covered by two ground stations, separated by 12 hours. It is however not necessary to have a permanent link with Simbol-X, since the average level of telemetry will be relatively low (about 10 Gbits per week for an average observation plan), and since the system has to be autonomous for its safety in the formation flight configuration. The baseline scheme is to have Simbol-X autonomous during observations, with data recorded onboard. The contact with Simbol-X is made nominally only for a change of target, which is conducted and followed in real time by the ground. At the same time, scientific data of the previous observation can be downloaded.

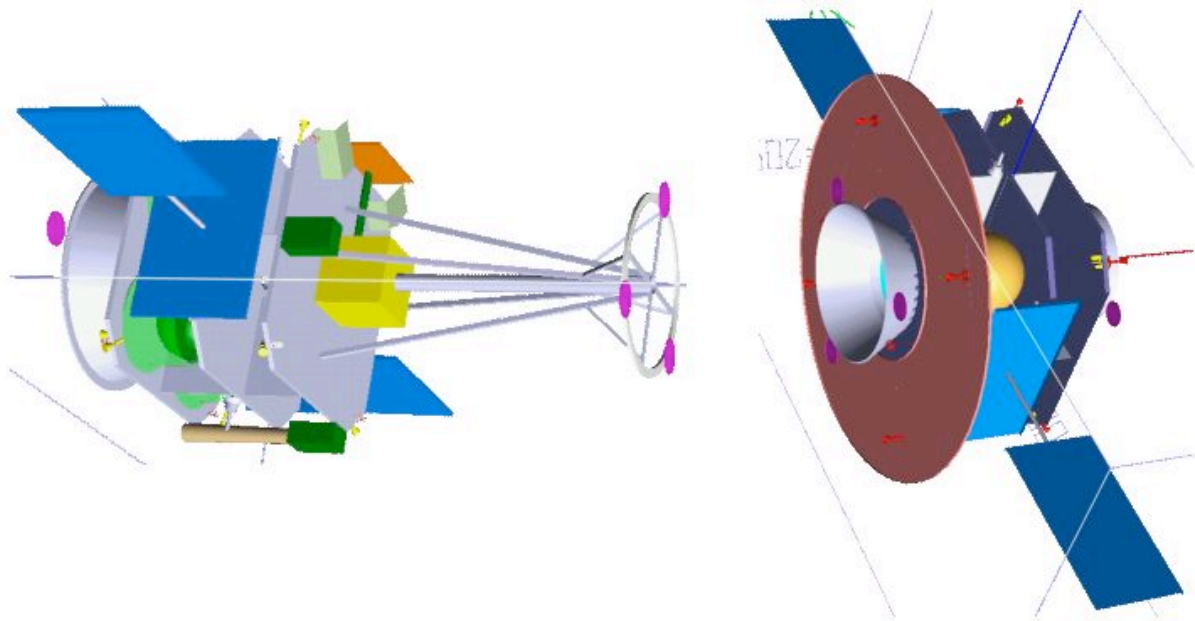


Figure 6 : Detector (left) and mirror (right) spacecrafts. The scale is not the same for the two spacecrafts. On the detector spacecraft, one can see the focal plane unit with a ~ 1.5 m collimator on top. On the mirror spacecraft, the prominent circular structure is the 3 m diameter sky baffle.

In view of the various scientific domains that will be covered by Simbol-X, and of the corresponding very large number of corresponding targets, Simbol-X is designed to offer two full years of scientific data taking, and to have the sufficient propellant resources to accommodate over 1000 different targets, with observation times ranging from ~ 20 ks for the brightest ones to 1 Ms or over for deep fields.

A relatively hard point of the design is the implementation of the collimator and sky baffle. In addition to its length, the metallic collimator should also not be a source of trouble for the systems in charge of the intersatellite links as well as those needed for the measurements of the relative positioning of the two spacecrafts. Depending on its final length, the collimator might be either implemented with the focal plane unit positioned on the spacecraft side facing the mirror, or in a configuration which puts the focal plane unit on the other side of the spacecraft, with the collimator going through the spacecraft structure, rendering the system more compact. The Figure 6 shows drawings of the mirror and detector spacecrafts corresponding to the first case, with a short collimator of ~ 1.5 m. The sky baffle on the mirror spacecraft, which has a diameter of 3 m here, can be seen together with the mechanical interface with the launcher.

The envisioned launch vehicle is a Soyuz with a Fregat upper stage. The fairing offers ample space for fitting the two spacecrafts, with two different options. One is to mate the two spacecrafts together, as a single composite spacecraft, for the launch operations up to the time when the composite reaches the operational orbit; the detector and mirror spacecrafts would then separate. The other option is to have the two spacecrafts as a dual launch, each of them reaching the operational orbit independently. This second option offers the advantage of simplifying all mechanical interfaces between the two spacecrafts; the Figure 6 drawings correspond to that case.

Detailed mass estimates have been done, including consumables for the observation program capabilities mentioned above, and the interfaces needed with the launcher. The total mass to be launched is around 2.2 tons, including the required margins at this level of study, for a launch capability of ~ 2.3 tons for the desired orbit.

5. CONCLUSIONS

The Simbol-X mission will provide an unprecedented sensitivity and angular resolution in the high energy domain, enabling to solve a number of outstanding questions in the non-thermal universe. Selected as a possible payload following the CNES call for ideas of a scientific mission for a formation flying demonstrator, it has undergone a detailed study which shows the feasibility of the mission within the given programmatic and technical constraints. Simbol-X is designed for a launch at the end of 2012, and for 2 years of scientific observations.

Simbol-X is expected to be further selected in fall 2005 for a competitive phase A, together with one other mission. As discussed in this paper, compared to the nominal initial baseline of paper I, it appears today possible to further improve the performances of Simbol-X, in particular for enlarging the field of view and increasing the effective area around 80 keV. This will be studied in depth during the phase A.

ACKNOWLEDGMENTS

We are profoundly indebted to all the people who are actively participating to the elaboration of the Simbol-X scientific proposal, as well as to the hardware development, and who are too numerous to be cited here. We also warmly acknowledge the PASO team of CNES, led by Paul Duchon and Rodolphe Cledassou, for the thorough Simbol-X mission study they have performed, as well as for allowing publication of material from this study in this paper.

REFERENCES

1. Ferrando P., M. Arnaud, B. Cordier, *et al.* : "SIMBOL-X, a new generation hard X-ray telescope", Proc. SPIE 5168, pp. 65-76, 2004
2. Dean A.J., A. Bazzano, A.B. Hill, *et al.* : "Global characteristics of the first IBIS/ISGRI catalogue sources : unveiling a murky episode of binary star evolution", A&A, in press, astro-ph/0508291
3. Bélanger G., A. Goldwurm, M. Renaud, *et al.* : "A persistent high-energy flux from the heart of the Milky Way : Integral's view of the Galactic center", Ap.J., in press, astro-ph/0508128
4. Aharonian F., A.G. Akhperjanian, A.R. Bazer-Bachi, *et al.* : "Detection of TeV g-ray emission from the shell-type supernova remnant RX J0852.0-4622 with HESS", A&A 437, L7-L10, 2005
5. Citterio O., G. Bonelli, G. Conti, *et al.* : Appl. Opt., 27, 1470, 1988
6. Pareschi G., O. Citterio O., M. Ghigo, *et al.* : "Replication by Ni electroforming approach to produce the Con-X/HXT hard X-ray mirrors", Proc. SPIE 4851, pp. 528-537, 2003
7. V. Cotroneo, and G. Pareschi : "Global optimization of X-ray multilayer mirrors with iterated simplex method", Proc. SPIE 5536, pp. 49-60, 2004
8. Powell F.R., R.A.M. Keski-Kuha, M.V. Zombeck, *et al.* : "Metalized Polyimide filters for X-ray astronomy and applications", Proc. SPIE 3113, pp. 432-440, 1997
9. Malaguti G., G. Pareschi, P. Ferrando, *et al.* : "Active and passive shielding design optimization and technical solutions for deep sensitivity hard X-ray focusing telescopes", Proc. SPIE, this vol., 2005
10. Treis J., P. Fischer, O. Häiker, *et al.* : "Noise and spectroscopic performance of DEPMOSFET matrix devices for XEUS", Proc. SPIE, this vol., 2005
11. Dirks B., *et al.* : 4th International Conference On New Developments In Photodetection, Beaune, to be published in NIM-A., 2005
12. Gevin O., *et al.* : 4th International Conference On New Developments In Photodetection, Beaune, to be published in NIM-A., 2005

Résumé

Mon activité de recherche en astrophysique entre les années 1990 et 2005 et celle des étudiants et chercheurs que j'ai encadrés, ont été centrées principalement sur l'étude des **trous noirs galactiques accréteurs** par le moyen d'observations astronomiques de leur **émission de haute énergie (X et gamma)**. Ce travail a été réalisé dans le cadre de projets d'astronomie spatiale dans lesquels mon laboratoire était impliqué et notamment dans les deux projets clefs de l'astronomie gamma européenne des années 1990 et 2000, la mission franco-russe **SIGMA/GRANAT** et celle de l'Agence Spatiale Européenne **INTEGRAL**. Mon rôle dans ces missions a été de développer les systèmes d'analyse des données et je me suis spécialisé dans les techniques d'analyse pour les **systèmes à ouvertures codées**, systèmes employés dans les télescopes des ces missions. Après avoir illustré mes contributions originales dans ce domaine, je décris dans ce mémoire les programmes scientifiques que j'ai développés et les résultats que j'ai obtenus sur les deux thèmes d'astrophysique des trous noirs auxquels j'ai contribué en manière significative.

Tout d'abord, grâce aux données gamma récoltées avec SIGMA et INTEGRAL, j'ai pu réaliser un programme d'études sur les **systèmes binaires serrées**, où un **trou noir de masse stellaire accrète** de la matière de l'étoile compagnon donnant lieu à de l'émission X/gamma. Le résultat majeur de ce travail a été la découverte d'une structure spectrale d'émission de haute énergie dans la nova X de la constellation de la Mouche. Je décris aussi plusieurs autres résultats obtenus grâce aux données gamma, couplés à des données X d'autres observatoires, sur 13 sources transitoires (**novas X**) et 3 **sources persistantes à trou noir** que j'ai pu étudier dans la gamme entre 1 et 1000 keV.

J'ai aussi développé un vaste programme scientifique concernant l'étude de **l'émission de haute énergie du trou noir supermassif du centre de la Galaxie**. Grâce au balayage profond effectué avec SIGMA j'ai d'abord établi des limites supérieures contraignantes à l'émission gamma de cet objet. Ce résultat a conduit au développement de nouveaux modèles décrivant les processus d'accrétion dans les trous noirs. Ensuite, j'ai découvert des sursauts X en provenance du trou noir central avec des données de l'observatoire **XMM-Newton** et plus récemment une source INTEGRAL qui coïncide avec le centre de la Galaxie. Je discute ces résultats dans le cadre de la physique du centre galactique et des processus d'accrétion et éjection dans les trous noirs.

Je présente enfin mon programme de recherche pour les années à venir, qui voit en première ligne mon implication dans un projet d'astronomie spatiale des hautes énergies, **SIMBOL-X**. Ce projet prévoit, par le moyen de deux satellites en formation, d'étendre la technique de focalisation par incidence rasante aux rayons X durs afin d'étudier les phénomènes non thermiques de notre univers.

Summary

High Energy Emission from Galactic Black Holes

Thesis submitted to obtain the diploma of
Habilitation à Diriger de Recherches
at the University of Paris 7 Denis Diderot

My research activity in astrophysics between 1990 and 2005, and the activity of the students and researchers that I directed, have been mainly centered on the study of **galactic accreting black holes** through astronomical observations of their **high energy (X-ray and gamma-ray) emission**. The work has been carried out in the frame of the space-born astronomy projects in which my laboratory was involved, in particular within the two recent European key-projects of gamma-ray astronomy, the French-Russian mission **SIGMA/GRANAT** and the European Space Agency (ESA) mission **INTEGRAL**. My role in these projects was to develop the data analysis system and I specialized in the analysis techniques for the **coded aperture systems**, which were employed for the telescopes carried by these missions. After a description of my contributions to the mission data analysis systems I report in this manuscript the scientific programs I developed and the main results I obtained on the two domains of black hole astrophysics to which I significantly contributed.

First of all, thanks to the data collected with SIGMA and INTEGRAL, I could develop a research program on the galactic **close binary systems** where a **stellar mass black hole** accretes matter from a companion star giving rise to X-ray/gamma-ray emission. The main result of this work has been the detection of a high energy emission feature in the X-ray Nova of the Musca constellation. This program also led to important results, obtained with both gamma-ray and X-ray data, on 13 black holes X-ray transients (of the **X-ray nova** type) and 3 **black hole persistent sources** that I could study in the energy band from 1 to 1000 keV.

Secondly I have developed a large scientific program concerning the study of the **high energy emission from the super-massive black hole at the centre of our Galaxy**. Thanks to the SIGMA deep survey of the Galactic Centre I could set stringent upper limits to the gamma-ray emission from this unique object. This result has led to the development of new models describing the accretion flow in black holes. Then I discovered X-ray flares coming from the central black hole with data of the **XMM-Newton** observatory and more recently an INTEGRAL source coincident with the centre of the Galaxy. I discuss these results in the frame of the physics of the Galactic Centre and of the accretion and ejection processes around black holes.

Finally, I present my research program for the next years, which includes the participation to the high energy astronomy space project **SIMBOL-X**. This project extends, by the mean of two formation flying satellites, the technique of grazing incidence focalisation to hard X-rays with the purpose to study the non-thermal phenomena of our universe.

ANNEXE

Habilitation à diriger des recherches de Andrea Goldwurm

LISTE COMPLETE DES PUBLICATIONS

(À la date du 31 aout 2006)

Nombre totale de publications scientifiques : 233

- 100 articles publiés, ou en cours de publication, dans des revues à comité de lecture (9 comme premier auteur)
- 108 articles publiés dans des comptes-rendus de conférences (20 comme premier auteur)
- 25 circulaires à l' UAI, télégrammes ATEL, GCNs (3 comme premier auteur)

Nombre d'éditions ou articles de divulgation : 2

- 1 livre (édition d'une conférence internationale)
- 1 article publié dans des revues de divulgation scientifique
- Quelque contribution à des revues ou sites de divulgation scientifique

Articles publiés dans des revues à comité de lecture [A]

1985

- 1 **Some Crucial X-Ray Observations - One or Two SNR(s) in Crux ?**
S. Mereghetti, G.F. Bignami, P.A. Caraveo, A. Goldwurm and G.G.C. Palumbo
1985, *Space Scie. Rev.*, V. 40, p. 495.

1986

- 2 **Exosat and Einstein X-Ray Observations of the SNR 1E 1149.4-6209 in Crux.A Unified Picture?**
G.F. Bignami, P.A. Caraveo, A. Goldwurm, S. Mereghetti, and G.G.C. Palumbo,
1986, *The Astrophysical Journal*, V. 302, p. 606.

1987

- 3 **Exosat and Einstein X-Ray Observations of the X-Ray Pulsar 4U 1145-619.**
S. Mereghetti, G.F. Bignami, P.A. Caraveo and A. Goldwurm,
1987, *The Astrophysical Journal*, V. 312, p. 755.
- 4 **Diffuse Einstein X-Ray Emission From The Region Of RCW49, A Bright Southern Emission Nebula.**
A. Goldwurm, .A. Caraveo, G.F. Bignami,
1987, *The Astrophysical Journal*, V. 322, p. 349.

1989

- 5 **A New 60-Msec X-Ray Pulsar And Its Massive Early-Type Companion.**
P.A. Caraveo, G.F. Bignami, A. Goldwurm,
1989, *The Astrophysical Journal*, V. 338, p. 338.
- 6 **The Gamma-Ray Emissivity Of The Earth's Atmosphere.**
A.J. Dean, K. Byard, A. Goldwurm, C.J. Hall, J.S.J. Harding,
1989, *Astronomy & Astrophysics*, V. 219, p. 358.
- 7 **Radioactivity Induced Background Noise In Space-Borne Astronomical Gamma-Ray Telescopes Employing Inorganic Scintillation Spectrometers.**
A.J. Dean, Lei Fan, K. Byard, A. Goldwurm, C.J. Hall,
1989, *Experimental Astronomy*, V. 1, p. 35.
- 8 **Beam Tests Of A 3-D Position Sensitive Scintillation Detector.**
C.J. Hall, B. Agrinier, K. Byard, A.J. Dean, A. Goldwurm, J.S. Harding, C. Labanti,
1989, *IEEE Trans. Nuc. Scie.*, V. 36, p.863.

1990

- 9 **Imaging Using Hura Coded Apertures With Discrete Pixel Detector Array.**
K. Byard, A.J. Dean, A. Goldwurm, C.J. Hall, J.S.J. Harding and F. Lei,
1990, *Astronomy & Astrophysics*, V. 227, p. 634.
- 10 **Laboratory Images With Hura Coded Apertures.**
A. Goldwurm, K. Byard, A.J. Dean, C.J. Hall, J.S.J. Harding,
1990, *Astronomy & Astrophysics*, V. 227, p. 640.

1991

- 11 **Two Hard X-Ray Sources In 100 Square Degrees Around Galactic Center.**
R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, M. Pavlinsky, S. Grebenev, G. Babalyan, I. Dekhanov, N. Yamburenko, L. Bouchet, M. Niel, J.P. Roques, P. Mandrou, A. Goldwurm, B. Cordier, P. Laurent, J. Paul,
1991, *Astronomy & Astrophysics Letters*, V. 247, p. L29.
- 12 **Sigma Discovery Of Variable E^+E^- Annihilation Radiation From The Near Galactic Center Variable Compact Source 1E1740.7-2942.**
Bouchet L., Mandrou P., Roques J.P., Vedrenne G., Cordier B., Goldwurm A., Lebrun F., Paul J., R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, M. Pavlinsky, S. Grebenev, G. Babalyan, I. Dekhanov, N. Khavenson,
1991, *The Astrophysical Journal*, V. 383, p. L45.
- 13 **Three Spectral States Of 1E 1740.7-2942: From Standard Cyg X-1 Type Spectrum To The Evidence Of Electron Positron Annihilation Feature.**
R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, M. Pavlinsky, S. Grebenev, G. Babalyan, I. Dekhanov, N. Khavenson, L. Bouchet, P. Mandrou, J.P. Roques, G. Vedrenne, B. Cordier, A. Goldwurm, F. Lebrun, J. Paul,
1991, *The Astrophysical Journal*, V. 383, p. L49.

1992

- 14 **Sigma/Granat Soft Gamma-Ray Observations Of The X-Ray Nova In Musca: Discovery Of Positron Annihilation Emission Line.**
A. Goldwurm, J. Ballet, B. Cordier, J. Paul, L. Bouchet, J.P. Roques, D. Barret, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Dyachkov, N. Khavenson, V. Kovtunenkov, R. Kremnev, K. Sukhanov,
1992, *The Astrophysical Journal*, V. 389, p.L79.
- 15 **Musca Nova (GRS 1124-68): Hard X-Ray Source With Narrow Annihilation Line In The Spectrum.**
R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Dyachkov, N. Khavenson, V. Kovtunenkov, R. Kremnev, K. Sukhanov, A. Goldwurm, J. Ballet, B. Cordier, J. Paul, M. Denis, G. Vedrenne, M. Niel, E. Jourdain,
1992, *The Astrophysical Journal*, V. 389, p. L75.
- 16 **Observations Of 4U 1700-377 With The Sigma Telescope.**
P. Laurent, A. Goldwurm, F. Lebrun, J. Paul, S. Mereghetti, D. Barret, L. Bouchet, J.P. Roques, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Kouznetov, R. Sunyaev, I. Chulkov, A. Diachkov, N. Khavenson, B. Novikov,
1992, *Astronomy & Astrophysics*, V. 260, p. 237.
- 17 **Sigma Observation Of Hard X-Ray Emission From The Ultra-Soft X-Ray Transient TRA X-1 (A 1524-61).**
D. Barret, J.P. Roques, P. Mandrou, L. Bouchet, F. Lebrun, A. Goldwurm, P. Laurent, J. Paul, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Dyachkov, N. Khavenson, B. Novikov, I. Chulkov, A. Kuznetsov,
1992, *The Astrophysical Journal*, V. 392, p. L19.
- 18 **A New Hard X-Ray Source 15' Away From 3C 273?**
E. Jourdain, L. Bassani, J.P. Roques, P. Mandrou, J. Ballet, A. Claret, A. Goldwurm, F. Lebrun, A. Finogenov, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Dyachkov, N. Khavenson, B. Novikov, N. Kuleshova,
1992, *The Astrophysical Journal*, V. 395, p. L69.

- 19 **SIGMA Soft γ -Ray Observations of 1E 1740.7-2942 in the Spring of 1992: Discovery of a Sub-Luminous State of Emission and Precise Position Measurement.**
B. Cordier, J. Paul, A. Goldwurm, P. Laurent, L. Bouchet, E. Jourdain, J.-P. Roques, P. Mandrou, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, N. Khavenson, A. Dyachkov, B. Novikov, R. Kremnev et V. Kovtunenکو, 1993, *Astronomy & Astrophysics*, V. 272, p. 277.
- 20 **The Soft γ -Ray Source 1E 1740.7-2942 Revisited: SIGMA Observation of a New Transient Activity Beyond 200 keV.**
B. Cordier, J. Paul, J. Ballet, A. Goldwurm, L. Bouchet, J.-P. Roques, P. Mandrou, G. Vedrenne, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, B. Novikov, I. Chulkov, N. Kuleshova, I. Tserenin et A. Sheikhet, 1993, *Astronomy & Astrophysics*, V. 275, p. L1.
- 21 **X-Ray Observations Of 4U 1700-377/HD153919 At 35-1300 keV By The SIGMA Telescope Of The GRANAT Observatory.**
A.F. Sitdikov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, E. Churazov, A. Dyachkov, R. Kremnev, K. Sukhanov, K. Kuleshova, P. Mandrou, J.-P. Roques, L. Bouchet, G. Vedrenne, P. Laurent, A. Claret, A. Goldwurm, B. Cordier, 1993, *Astronomy Letters*, V. 19, p. 188.
- 22 **A Search for Weak Gamma-Ray Bursts with GRANAT/SIGMA.**
R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, O. Terekhov, A. Dyachkov, N. Khavenson, V. Kovtunenکو, R. Kremnev, A. Claret, F. Lebrun, A. Goldwurm, J. Paul, F. Pelaez, J.-L. Atteia, P. Mandrou et G. Vedrenne, 1993, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, V. 97, p. 85.
- 23 **Spectral States of 1E 1740.7-2942.**
E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Dyachkov, N. Khavenson, V. Kovtunenکو, R. Kremnev, K. Sukhanov, M. Niel, L. Bouchet, P. Mandrou, J.-P. Roques, B. Cordier, A. Goldwurm, F. Lebrun et J.-P. Leray, 1993, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, V. 97, p. 173
- 24 **Two Years Monitoring of Persistent Point Sources in the Galactic Center Region at Soft Gamma-Ray Energies with SIGMA.**
B. Cordier, A. Goldwurm, J.-P. Leray, J. Paul, L. Bouchet, P. Mandrou, M. Niel, J.-P. Roques, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Dyachkov, N. Khavenson, R. Kremnev, K. Sukhanov et N. Kuleshova, 1993, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, V. 97, p. 177.
- 25 **SIGMA Observations of Two X-Ray Transients: KS 1731-260 and TrA X-1.**
D. Barret, P. Mandrou, J.-P. Roques, M. Denis, F. Lebrun, A. Claret, A. Goldwurm, P. Laurent, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Bogomolov, N. Khavenson, N. Kuleshova, I. Tserenin et K. Sukhanov, 1993, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, V. 97, p. 241.
- 26 **SIGMA Observations of the X-Ray Nova in Musca.**
A. Goldwurm, J. Ballet, P. Laurent, J. Paul, E. Jourdain, L. Bouchet, P. Mandrou, J.-P. Roques, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Dyachkov, N. Khavenson, R. Kremnev, K. Sukhanov et N. Kuleshova, 1993, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, V. 97, p. 293.

- 27 The Spectra of Nova Muscae from Standard X-Rays to Low Gamma-Rays Observed with GRANAT.**
M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, S. Grebenev, M. Pavlinsky, A. Dyachkov, V. Kovtunenkov, R. Kremnev, A. Goldwurm, J. Ballet, P. Laurent, J. Paul, E. Jourdain, M.-C. Schmitz-Fraysse, J.-P. Roques, P. Mandrou,
1993, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, V. 97, p. 303.
- 28 Discovery of the High Energy Emission from the Transient X-Ray Pulsar GRS 0834-430.**
M. Denis, J.-P. Roques, D. Barret, F. Lei, A. Claret, F. Lebrun, A. Goldwurm, J.-P. Leray, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Bogomolov, N. Khavenson, N. Kuleshova, I. Tserenin, K. Sukhanov,
1993, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, V. 97, p. 333.
- 29 A High-Sensitivity Search for Gamma-Ray Bursts by the SIGMA Telescope on Board GRANAT (The Galactic Center and All Sky Data).**
R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, O. Terekhov, A. Dyachkov, N. Khavenson, V. Kovtunenkov, R. Kremnev, A. Claret, F. Lebrun, A. Goldwurm, J. Paul, F. Pelaez, J.-L. Atteia, P. Mandrou, G. Vedrenne,
1993, *The Astrophysical Journal*, V. 402, p. 579.
- 30 Low-Flux Hard State of 1E 1740.7-2942.**
E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, M. Pavlinsky, S. Grebenev, A. Dyachkov, V. Kovtunenkov, R. Kremnev, L. Bouchet, P. Mandrou, J.-P. Roques, G. Vedrenne, B. Cordier, A. Goldwurm, F. Lebrun, J. Paul,
1993, *The Astrophysical Journal*, V. 407, p. 752.
- 31 Location and Spectrum of X-Ray Transient Source GRS 1915+105.**
A. Finogenov, A. Vikhlinin, M. Gilfanov, R. Sunyaev, E. Churazov, A. Dyachkov, N. Khavenson, I. Tserenin, M.-C. Schmitz-Fraysse, M. Denis, J.-P. Roques, P. Mandrou, A. Claret, J. Ballet, B. Cordier, A. Goldwurm,
1993, *Astronomy Letters*, V. 19, p. 435.
- 32 Three Years of Monitoring of GRS 1758-258: an Extremely Hard X-Ray Source near GX5-1.**
M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, N. Khavenson, B. Novikov, A. Dyachkov, R. Kremnev, K. Sukhanov, L. Bouchet, P. Mandrou, J.-P. Roques, G. Vedrenne, B. Cordier, A. Goldwurm, P. Laurent, J. Paul,
1993, *The Astrophysical Journal*, V. 418, p. 844.
- 1994**
- 33 Observations of Electron-Positron Annihilation Features in the Spectra of Black Hole Candidates and Crab Nebula by GRANAT/SIGMA.**
M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, N. Khavenson, B. Novikov, A. Dyachkov, I. Tserenin, K. Sukhanov, L. Bouchet, P. Mandrou, J.-P. Roques, G. Vedrenne, J. Paul, B. Cordier, A. Goldwurm, F. Lebrun
1994, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, V. 92, p. 411.
- 34 Noise Variability of the Hard X-Ray Transient Nova Persei Observed with SIGMA.**
M. Denis, J.-F. Olive, P. Mandrou, J.-P. Roques, J. Ballet, A. Goldwurm, P. Laurent, B. Cordier, A. Vikhlinin, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Dyachkov, N. Khavenson, R. Kremnev, V. Kovtunenkov,
1994, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, V. 92, p. 459.
- 35 SIGMA Observation of the Bright X-Ray Transient Nova Persei: A New Black Hole Candidate?**
J.-P. Roques, L. Bouchet, E. Jourdain, P. Mandrou, A. Goldwurm, J. Ballet, A. Claret, F. Lebrun, A. Finogenov, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, B. Novikov, I. Chulkov, N. Kuleshova, & I. Tserenin,

1994, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, V. 92, p. 45.

- 36 **SIGMA Hard X-Ray Observations of the Burst Source MXB 1728-33.**
A. Claret, A. Goldwurm, B. Cordier, J. Paul, J.-P. Roques, L. Bouchet, M.-C. Schmitz-Fraysse, P. Mandrou, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, N. Khavenson, A. Dyachkov, B. Novikov, R. Kremnev, & V. Kovtunenکو,
1994, *The Astrophysical Journal*, V. 423, p. 436.
- 37 **Localization and Spectrum of X-Ray Transient Source GRS 1915+105.**
A. Finogenov, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Vikhlinin, A. Dyachkov, N. Khavenson, I. Tserenin, M.-C. Schmitz-Fraysse, M. Denis, J.-P. Roques, P. Mandrou, A. Claret, J. Ballet, B. Cordier, & A. Goldwurm,
1994, *The Astrophysical Journal*, V. 424, p. 940.
- 38 **Evidence for a Soft X-Ray Excess in the Spectrum of GRS 1758-28.**
S. Mereghetti, T. Belloni, & A. Goldwurm,
1994, *The Astrophysical Journal (Letters)*, V. 433, p. L21.
- 39 **Possible Evidence Against a Massive Black Hole at the Galactic Centre.**
A. Goldwurm, B. Cordier, J. Paul, J. Ballet, L. Bouchet, J.-P. Roques, G. Vedrenne, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Finogenov, A. Vikhlinin, A. Dyachkov, N. Khavenson, & V. Kovtunenکو,
1994, *Nature*, V. 371, p. 589.

1995

- 40 **Hard X-Ray Variability of X-Ray Nova Persei 1992 : GRANAT/SIGMA Results.**
A. Vikhlinin, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Finogenov, A. Dyachkov, R. Kremnev, K. Sukhanov, J. Ballet, A. Goldwurm, B. Cordier, A. Claret, M. Denis, J.-F. Olive, J.-P. Roques & P. Mandrou,
1995, *The Astrophysical Journal*, V. 441, p. 779.
- 41 **Detection of A 1742-294 X-Ray Burster above 35 keV.**
E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, B. Novikov, I. Chulkov, V. Kovtunenکو, A. Sheikhet, K. Sukhanov, A. Goldwurm, B. Cordier, J. Paul, P.-O. Petrucci, E. Jourdain, J.-P. Roques, L. Bouchet & P. Mandrou,
1995, *The Astrophysical Journal*, V. 443, p. 341.
- 42 **Imaging Techniques Applied to the Coded Mask SIGMA Telescope.**
A. Goldwurm,
1995, *Experimental Astronomy*, V. 6, p. 9.

1996

- 43 **SIGMA Hard X-Ray Observations of the Galactic Bulge Source SLX 1735-269.**
A. Goldwurm, M. Vargas, J. Paul, S. Faisse, L. Bouchet, V. Borrel, J.-P. Roques, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, N. Khavenson, A. Dyachkov, A. Sheikhet, R. Kremnev & V. Kovtunenکو,
1996, *Astronomy & Astrophysics*, V. 310, p. 857.
- 44 **SIGMA Discovery of a Transient Hard X-Ray Source in the Galactic Center Region.**
M. Vargas, A. Goldwurm, J. Paul, M. Denis, V. Borrel, L. Bouchet, J.-P. Roques, E. Jourdain, S. Trudolyubov, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, N. Khavenson, A. Dyachkov, B. Novikov, I. Chulkov ,

1996, *Astronomy & Astrophysics*, V. 313, p. 828.

- 45 SIGMA detection of Hard X-ray Emission from the Terzan 1 Globular Cluster.**
V. Borrel, L. Bouchet, E. Jourdain, J.-P. Roques, M. Vargas, A. Goldwurm, M. Denis, J. Paul, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, S. Gerbenev, M. Pavlinsky, A. Dyachkov, N. Khavenson, I. Chulkov,
1996, *The Astrophysical Journal*, V. 462, p. 754.
- 46 SIGMA Survey of the Galactic Center Region and Discovery of a Hard X-ray Transient.**
M. Vargas, A. Goldwurm, M. Denis, J. Paul, V. Borrel, J.-P. Roques, E. Jourdain, M. Niel, S. Trudolyubov, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Dyachkov, N. Khavenson, I. Chulkov, A. Bogomolov,
1996, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, V. 120, p. C291.
- 47 SIGMA/GRANAT Observations of the X-Ray Transient KS/GRS 1730-312 in Scorpius**
S.P. Trudolyubov, M.R. Gilfanov, E.M. Churazov, K.N. Borozdin, N.L. Aleksandrovich, R.A. Sunyaev, N.G. Khavenson, B.S. Novikov, M. Vargas, A. Goldwurm, J. Paul, M. Denis, V. Borrel, L. Bouchet, E. Jourdain & J.-P. Roques,
1996, *Astronomy Letters*, V. 22, p. 664.
- 48 SIGMA/GRANAT Observations of the X-Ray Nova Persei 1992.**
A.V. Finoguenov, M.R. Gilfanov, E.M. Churazov, R.A. Sunyaev, A.A. Vikhlinin, S.S. Kuznetsov, A.V. Dyachkov, R.S. Kremnev, M. Denis, J. Ballet, A. Goldwurm, P. Laurent, E. Jourdain, J.-P. Roques, L. Bouchet,
1996, *Astronomy Letters*, V. 22, p. 721.

1997

- 49 ASCA Observations of the Galactic Bulge Hard X-Ray Source GRS 1758-258.**
S. Mereghetti, D.I. Cremonesi, F. Hardt, T. Murakami, T. Belloni, A. Goldwurm,
1997, *The Astrophysical Journal*, V. 476, p. 829.
- 50 ASCA Observations of the Galactic Bulge Source SLX 1735-269.**
P. David, A. Goldwurm, T. Murakami, J. Paul, P. Laurent, P. Goldoni.,
1997, *Astronomy & Astrophysics*, V. 322, p. 229
- 51 SIGMA/GRANAT Discovery of GRS 1739-278, a Hard X-Ray Transient in the Galactic Bulge.**
M. Vargas, A. Goldwurm, P. Laurent, J. Paul, E. Jourdain, J.-P. Roques, V. Borrel, L. Bouchet, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, B. Novikov, A. Dyachkov, N. Khavenson, K. Sukhanov & N. Kuleshova,
1997, *The Astrophysical Journal*, V. 476, p.L23
- 52 Properties of the X-Ray Radiation from Cygnus X-1 and 1E 1740.7-2942.**
S. Kuznetsov, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, I. Korel, N. Khavenson, A. Dyachkov, I. Chulkov, J. Ballet, P. Laurent, M. Vargas, A. Goldwurm, J.-P. Roques, E. Jourdain, L. Bouchet & V. Borrel,
1997, *M.N.R.A.S.*, V. 292, p.651.

1998

- 53 SIGMA Observations of X-Ray Nova Velorum 1993 (GRS 1009-45).**
P. Goldoni, M. Vargas, A. Goldwurm, P. Laurent, J.-P. Roques, E. Jourdain, J. Malzac, G. Vedrenne, M. Revnivtsev, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Dyachkov, N. Khavenson, N. Tserenin, N. Kuleshova,
1998, *Astronomy & Astrophysics*, V. 329, p.186

- 54 Hard X-Ray Observations of X-Ray Nova Ophiuchi 1993 (GRS 1716-249) with GRANAT/SIGMA.**
M. Revnivtsev, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, K. Borozdin, N. Alexandrovich, N. Khavenson, I. Chulkov, A. Goldwurm, J. Ballet, M. Denis, P. Laurent, J.-P. Roques, V. Borrel, L. Bouchet, E. Jourdain, 1998, *Astronomy & Astrophysics*, V. 331, p. 557.

1999

- 55 Sigma And RXTE Observations Of The Soft X-Ray Transient XTE J1755-324.**
Goldoni, P., Vargas, M., Goldwurm, A., Paul, J., Borrel, V., Jourdain, E., Bouchet, L., Roques, J.-P., Revnivtsev, M., Churazov, E., Gilfanov, M., Sunyaev, R., Dyachkov, A., Khavenson, N., Tserenin, I., Kuleshova, N.,
1999, *The Astrophysical Journal*, V. 511, p. 847.
- 56 GRANAT/Sigma Observation of the Early Afterglow from GRB920723 in Soft Gamma-Rays.**
Burenin, R. A., Vikhlinin, A. A., Terekhov, O. V., Tkachenko, A. Yu., Sazonov, S. Yu., Gilfanov, M. R., Churazov, E. M., Sunyaev, R. A., Goldoni, P., Claret, A., Goldwurm, A., Paul, J., Roques, J.-P., Jourdain, E., Vedrenne, G., Mandrou, P.,
1999, *Astronomy and Astrophysics*, V. 344, p. L53.
- 57 Long-Term Variability Of The Hard X-Ray Source GRS 1758-258: Granat/Sigma Observations.**
Kuznetsov, S. I., Gilfanov, M. R., Churazov, E. M., Sunyaev, R. A., D'yachkov, A. V., Khavenson, N. G., Novikov, B. S., Kremnev, R. S., Goldoni, P., Goldwurm, A., Laurent, P., Paul, J., Roques, J.-P., Jourdain, E., Bouchet, L., Vedrenne, G.,
1999, *Astronomy Letters*, V. 25, p. 351.
- 58 Afterglow Of The Gamma-Ray Burst Of July 23, 1992, As Observed By The Sigma/Granat Telescope.**
Burenin, R. A., Vikhlinin, A. A., Terekhov, O. V., Tkachenko, A. Yu., Sazonov, S. Yu., Gilfanov, M. R., Churazov, E. M., Sunyaev, R. A., Goldoni, P., Claret, A., Goldwurm, A., Paul, J., Roques, J.-P., Jourdain, E., Vedrenne, G., Mandrou, P.,
1999, *Astronomy Letters*, V. 25, p. 411.
- 59 GRANAT and RXTE Observations of the X-ray Nova XTE J1755-324.**
Revnivtsev, M. G., Gilfanov, M. R., Churazov, E. M., Trudolyubov, S. P., Sunyaev, R. A., D'yachkov, A. V., Khavenson, N. G., Tserenin, I. D., Goldoni, P., Vargas, M., Goldwurm, A., Paul, J., Borrel, V., Jourdain, E., Bouchet, L., Roque, J.-P.,
1999, *Astronomy Letters*, V. 25, p. 493.
- 60 GRANAT/SIGMA observation of GRB 920723 soft gamma-ray afterglow.**
Burenin, R. A., Vikhlinin, A. A., Terekhov, O. V., Tkachenko, A. Yu., Sazonov, S. Yu., Gilfanov, M. R., Churazov, E. M., Sunyaev, R. A., Goldoni, P., Claret, A., Goldwurm, A., Paul, J., Roques, J. P., Jourdain, E., Vedrenne, G., Mandrou, P.,
1999, *Astronomy & Astrophysics Supp.*, V. 138, p. 443

2000

- 61 Observations of Cosmic Gamma-Ray Bursts with the Main Detector of the SIGMA Telescope onboard the GRANAT Observatory.**
Burenin, R. A., Terekhov, O. V., Sunyaev, R., D'yachkov, A. V., Khavenson, N. G., Novikov, B. S., Tserenin, I. D., Sukhanov, K. M., Goldoni, P., Claret, A., Goldwurm, A., Paul, J., Pelaez, F., Jourdain, E., Roques, J.-P., Vedrenne, G.,

2000, *Astronomy Letters*, V. 26, p. 413.

2001

- 62 The SIGMA/GRANAT Telescope : Calibration and Data Reduction.**
L. Bouchet, J.-P. Roques, J. Ballet, A. Goldwurm and J. Paul,
2001, *The Astrophysical Journal*, V. 548, p. 990.
- 63 Qualification Model of the Space ISGRI CdTe Gamma-ray Camera.**
O. Limousin, C. Blondel, C. Bonnin, J. Cretolle, A. Goldwurm, B. Horeau, P. Laurent, F. Lebrun, J.P. Leray,
2001, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 471, 174.

2002

- 64 XMM-Newton Spectroscopy of the Galactic Microquasar GRS 1758-258 in the Peculiar Off/Soft State**
J.M. Miller, R. Wijnands, P.M. Rodriguez-Pascual, P. Ferrando, B.M. Gaensler, A. Goldwurm, W.H. Lewin, D. Pooley
2002, *The Astrophysical Journal*, 566, 358
- 65 XMM-Newton Observation of the Bursting Pulsar GRO J 1744-28 in Quiescence**
F. Daigne, P. Goldoni, A. Goldwurm, P. Ferrando, A. Decourchelle, R. S. Warwick
2002, *Astronomy and Astrophysics*, 386, 531.

2003

- 66 A New X-Ray Flare from the Galactic Nucleus Detected with the XMM-Newton European Photon Imaging Cameras**
A. Goldwurm, E. Brion, P. Goldoni, P. Ferrando, F. Daigne, A. Decourchelle, R. S. Warwick, P. Predehl
2003, *Astrophysical Journal*, 584, 751.
- 67 XMM-Newton study of the persistent X-ray source 1E 1743.1-2843 located in the Galactic Center direction**
Porquet, D.; Rodriguez, J.; Corbel, S.; Goldoni, P.; Warwick, R. S.; Goldwurm, A.; Decourchelle, A.
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 406, 299.
- 68 XMM-Newton Observation of the Brightest X-Ray Flare Detected so far from Sgr A***
Porquet D., Predehl P., B. Aschenbach, N. Grosso, A. Goldwurm, P. Goldoni, R. S. Warwick, A. Decourchelle,
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 407, L17.
- 69 An XMM-Newton observation of IGR J16320-4751 = AX J1631.9-4752**
Rodriguez, J.; Tomsick, J. A.; Foschini, L.; Walter, R.; Goldwurm, A.; Corbel, S.; Kaaret, P.
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 407, L41.
- 70 IBIS: The Imager on-board INTEGRAL**
P. Ubertini, F. Lebrun, G. Di Cocco, A. Bazzano, A. J. Bird, K. Broenstad, A. Goldwurm, G. La Rosa, C. Labanti, P. Laurent, I. F. Mirabel, E. M. Quadrini, B. Ramsey, V. Reglero, L. Sabau, B. Sacco, R. Staubert, L. Vigroux, M. C. Weisskopf and A. A. Zdziarski
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L131.
- 71 In-flight calibration of the ISGRI camera**
R. Terrier, F. Lebrun, A. Bazzano, G. Belanger, A. J. Bird, C. Blondel, P. David, P. Goldoni, A.

Goldwurm, A. Gros, P. Laurent, G. Malaguti, A. Sauvageon, A. Segreto and P. Ubertini
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L167.

- 72 The INTEGRAL IBIS/ISGRI System Point Spread Function and Source Location Accuracy**
A. Gros, A. Goldwurm, M. Cadolle-Bel, P. Goldoni, J. Rodriguez, L. Foschini, M. Del Santo and P. Blay
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L179.
- 73 The INTEGRAL/IBIS scientific data analysis**
A. Goldwurm, P. David, L. Foschini, A. Gros, P. Laurent, A. Sauvageon, A. J. Bird, L. Lerusse and N. Produit
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L223.
- 74 IBIS performances during the Galactic Plane Scan - I. The Cygnus region**
M. Del Santo, J. Rodriguez, P. Ubertini, A. Bazzano, A. J. Bird, F. Capitanio, L. Foschini, A. Goldwurm,
F. Lebrun, A. Paizis and A. Segreto
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L369.
- 75 First results from the IBIS/ISGRI data obtained during the Galactic Plane Scan - II. The Vela region**
Rodriguez, M. Del Santo, F. Lebrun, G. Belanger, M. Cadolle-Bel, F. Capitanio, P. David, L. Foschini, P. Goldoni, A. Goldwurm, A. Gros, P. Laurent, A. Paizis, J. Paul, R. Terrier, S. E. Shaw and P. Ubertini
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L373.
- 76 IBIS preliminary results on Cygnus X-1 spectral and temporal characteristics**
A. Bazzano, A. J. Bird, F. Capitanio, M. Del Santo, P. Ubertini, A. A. Zdziarski, G. Di Cocco, M. Falanga, P. Goldoni, A. Goldwurm, P. Laurent, F. Lebrun, G. Malaguti and A. Segreto
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L389.
- 77 First results of IBIS/ISGRI Cygnus X-3 monitoring during INTEGRAL PV phase**
P. Goldoni, J. M. Bonnet-Bidaud, M. Falanga and A. Goldwurm
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L399.
- 78 First observations of the X-ray transient EXO 2030+375 with IBIS/ISGRI**
S. Kuznetsov, M. Falanga, P. Blay, A. Goldwurm, P. Goldoni and V. Reglero
2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L437.

2004

- 79 INTEGRAL Detection of Hard X-Ray Emission from the Galactic Nuclear Region**
G. Bélanger, A. Goldwurm, P. Goldoni, J. Paul, R. Terrier, M. Falanga, P. Ubertini, A. Bazzano, M. Del Santo, C. Winkler, A.N. Parmar, E. Kulkeers, K. Ebisawa, J.P. Roques, N. Lund, F. Melia
2004, *Astrophysical Journal Letters*, 601, L163.
- 80 Compact sources as the origin of the soft gamma-ray emission of the Milky Way**
Lebrun, F.; Terrier, R.; Bazzano, A.; Bélanger, G.; Bird, A.; Bouchet, L.; Dean, A.; Del Santo, M.; Goldwurm, A.; Lund, N. and 9 coauthors
2004, *Nature*, 428, L293
- 81 Hard X-ray sky survey with the SIGMA telescope aboard GRANAT observatory**
M.G.Revnivtsev, R.A. Sunyaev, M.R.Gilfanov, E.M.Churazov, A. Goldwurm, J.Paul P.Mandrou, J.P.Roques
2004, *Astronomy Letters*, 30, 527
- 82 INTEGRAL, XMM-Newton and Rossi-XTE Observations of the State Transition of the X-ray**

Transient and Black Hole Candidate XTE J1720-318

Cadolle Bel, M.; Rodriguez, J.; Sizun, P.; Farinelli, R.; Del Santo, M.; Goldwurm, A.; Goldoni, P.; Corbel, S.; P.; Parmar, A. N.; Kuulkers, E.; del Santo, M.; Ubertini, P.; Frontera, F., Amati, L.; Roques, J.-P.; Westergard, J.
2004, *Astronomy & Astrophysics*, 426, 659

83 The discovery of hard X-ray emission in the persistent flux of the Rapid Burster

Falanga, M.; Farinelli, R.; Goldoni, P.; Frontera, F.; Goldwurm, A.; Stella, L.
2004, *Astronomy & Astrophysics*, 426, 979

2005

84 INTEGRAL SPI Limits on Electron-Positron Annihilation Radiation from the Galactic

Teegarden, B. J.; Watanabe, K.; Jean, P.; Knödseder, J.; Lonjou, V.; Roques, J. P.; Skinner, G. K.; von Ballmoos, P.; Weidenspointner, G.; Bazzano, A., ... A. Goldwurm, ...
2005, *Astrophysical Journal Letters*, 621, 296

85 3-200 keV Spectral States and Variability of the INTEGRAL Black Hole Binary IGR J17464-3213

Capitanio, F.; Ubertini, P.; Bazzano, A.; Kretschmar, P.; Zdziarski, A. A., ..., Goldwurm, A.,
2005, *Astrophysical Journal*, 622, 503.

86 1E 1740.7-2942 Temporal and Spectral Evolution from INTEGRAL and RXTE observations

Del Santo, M.; Bazzano, A.; Zdziarski, A. A., Smith, D.M., .Bezayiff, N., ..., Goldwurm, A.,
2005, *Astronomy & Astrophysics*, 433, 613.

87 High-Energy pulse profile of the Transient X-ray Pulsar SAX J2103.5+4545

M. Falanga, T. Di Salvo, L. Burderi, J. M. Bonnet-Bidaud, P. Goldoni, A. Goldwurm, G. Lavagetto, R. Iaria, N. R. Robba
2005, *Astronomy & Astrophysics*, 436, 313

88 INTEGRAL spectroscopy of the accreting millisecond pulsar XTE J1807-294 in outburst

M. Falanga, J. M. Bonnet-Bidaud, J. Poutanen, R. Farinelli, A. Martocchia, P. Goldoni, J. L. Qu, L. Kuiper, A. Goldwurm
2005, *Astronomy & Astrophysics*, 436, 647

89 X-Ray Observations of the Black Hole Transient 4U 1630-47 during 2 Years of X-Ray

Tomsick, J.A., Corbel, S., Goldwurm, A., Kaaret, P.
2005, *Astrophysical Journal*, 630, 413

90 Discovery of X-ray eclipses from the transient source CXOGC J174540.0-290031 with XMM-Newton

D. Porquet, N. Grosso, G. Belanger, A. Goldwurm, F. Yusef-Zadeh, R. Warwick, P. Predhel
2005, *Astronomy & Astrophysics*, 443, 571

91 Repeated X-ray Flaring Activity in Sagittarius A*

G. Belanger, A. Goldwurm, F. Melia, F. Yusef-Zadeh, P. Ferrando, D. Porquet, N. Grosso, R. Warwick
2005, *Astrophysical Journal*, 635, 1095

92 INTEGRAL and RXTE observations of accreting millisecond pulsar IGR J00291+5934 in outburst

M. Falanga, L. Kuiper, J. Poutanen, E. W. Bonning, W. Hermsen, T. Di Salvo, P. Goldoni, A. Goldwurm, S. E. Shaw, L. Stella
2005, *Astronomy & Astrophysics*, 444, 15

2006

- 93 **A Persistent High-Energy Flux from the Heart of the Milky Way : Integral's view of the Galactic Center**
G. Belanger, A. Goldwurm, M. Renaud, R. Terrier, F. Melia, N. Lund, J. Paul, F. Yusef-Zadeh
2006, *Astrophysical Journal*, 636, 275

- 94 **The broad-band spectrum of Cygnus X-1 measured by INTEGRAL**
M. Cadolle Bel, P. Sizun, A. Goldwurm, J. Rodriguez, P. Laurent, A. A. Zdziarski, L. Foschini, P. Goldoni, C. Gouiffes, J. Malzac, E. Jourdain, J.-P. Roques
2006, *Astronomy & Astrophysics*, 446, 591

- 95 **A Multi-Wavelength Study of Sgr A*: the Role of Near-IR Flares in Production of X-ray, Soft Gamma-rays and Submillimeter Emission**
F. Yusef-Zadeh, C.D. Dowell, M. Wardle, D. Roberts C. Heinke, G. C. Bower, B. Vila Vilaro, S. Shapiro, A. Goldwurm, G. Belanger,
2006, *Astrophysical Journal*, 644, 198

- 96 **Two Phase X-ray Burster from GX 3+1 observed by INTEGRALNTEGRAL**
J. Chenevez, M.. Falanga, S. Brandt, R. Farinelli, F. Frontera, A. Goldwurm, E. Kuulkers, N. Lund
2006, *Astronomy & Astrophysics*, 449, L5

- 97 **INTEGRAL and XMM-Newton observations of the X-ray pulsar IGR J16320-4751/AX J1631.9-4752**
J. Rodriguez, A. Bodaghee, P. Kaaret, J.A. Tomsick, E. Kuulkers, G. Malaguti, P.-O. Petrucci, C. Cabanac, M. Chernyakova, S. Corbel, S. Deluit, G. Di Cocco, K. Ebisawa, A. Goldwurm, G. Henri, F. Lebrun, A. Paizis, R. Walter, L. Foschini
2006, *Monthly Notices Royal Astronomical Society*, 366, 274

- 98 **Bimodal spectral variability of Cygnus X-1 in an intermediate state**
J. Malzac, P.O. Petrucci, E. Jourdain, M. Cadolle, P. Sizun, G. Pooley, C. Cabanac, S. Chaty, T. Belloni, J. Rodriguez, J.P. Roques, P. Durouchoux, A. Goldwurm, P. Laurent,
2006, *Astronomy & Astrophysics*, 448, 1125

- 99 **Periodic Modulations in an X-ray Flare from Sagittarius A***
G. Belanger, R. Terrier, O. De Jagger, A. Goldwurm, F. Melia,
2006, *Astrophysical Journal Letters*, submitted, astroph/0604337

- 100 **Imaging extended sources with coded mask telescopes: Application to the INTEGRAL IBIS/ISGRI instrument**
M. Renaud, A. Gros, F. Lebrun, R. Terrier, A. Goldwurm, S. Reynolds, E. Kalemci,
2006, *Astronomy & Astrophysics*, in press, astroph/0606113

Articles publiés dans des compte-rendus de conférences [C]

1986

- 1 **Exosat And Einstein Observations Of The X-Ray Pulsar 4U1145-619.**
A. Goldwurm, G.F. Bignami, P.A. Caraveo, S. Mereghetti,
1986, *Conference on "Variability of Galactic and Extragalactic X-Ray Sources"*, 20-22 October 1986, Como, Italy.

1988

- 2 **A New 60-Msec X-Ray Pulsar And Its Massive Early-Type Companion.**
P.A. Caraveo, G.F. Bignami, A. Goldwurm,
1988, *"Timing Neutron Stars" Proceedings of the NATO ASI*, Cesme 4-16/4/1988, eds. H. Ogelman and E. van der Hueven, p. 243.
- 3 **Position Sensitive Scintillation Bars: Laboratory Tests And Optical Monte Carlo Modelling.**
C.J. Hall, A.J. Dean, K. Byard, A. Goldwurm, J.S. Harding, B.M. Swinyard,
1988, *Workshop "Astrophysics with GRASP"*, 31 May - 2 June 1988, Observatoire de Paris, Meudon, France.

1989

- 4 **A Three Dimensional High Energy Photon Detector For Gamma-Ray Astronomy.**
C.J. Hall, A.J. Dean, K. Byard, A. Goldwurm, A. Bussini, G. Villa, E. Caroli, C. Labanti, A. Spizzichino, B. Agrinier, B.M. Swinyard,
1989, *SPIE 33rd Annual International Symposium*, 6-11 August 1989, San Diego, U.S.A., *SPIE*, V. 1159, p. 81.

1990

- 5 **Optical Follow-Up Identifications Of Hard X-Ray/Soft Gamma-Ray Sources Discovered By The "Sigma" Telescope.**
Bignami G.F., Caraveo P.A., Mereghetti S., Paul J., Goldwurm A., Vigroux L., Mandrou P., Vedrenne G., Roques J.P.,
1990, *The Messenger*, V. 60, p.16.
- 6 **Optical Identifications Of Celestial High Energy Sources.**
Bignami G.F., Caraveo P.A., Mereghetti S., Paul J., Cordier B., Goldwurm A., Mandrou P., Roques J.P., Vedrenne G.,
1990, *The Messenger*, V. 66, p.10.
- 7 **Observation Of 4U1700-377 With The Sigma Telescope.**
Laurent P., Bouchet L., Goldwurm A., Lebrun F., Mandrou P., Natalucci L., Paul J., Roques J., Sunyaev R., Stepanov D., Iounin S., Tchoulkov I., Koutnesov A., Diachkov A., Khavenson N., & Novikov,
1990, *12th European Cosmic-Ray Symposium*, 15th-21st July 1990, Nottingham, England.

- 8 **Sigma: The Hard X-Ray And Soft Gamma-Ray Telescope On Board The Granat Space Observatory.**
J. Paul, P. Mandrou, J. Ballet, M. Cantin, J.P. Chabaud, B. Cordier, M. Ehanno, A. Goldwurm, A. Lambert, J. Landé, Ph. Laurent, F. Lebrun, J.P. Leray, B.Mena, M. Niel, J.P. Roques, G. Rouaix, L. Salotti, P. Souleille, G. Vedrenne,
1991, Proc. COSPAR XXVIII Symp. ME.4, *Advances in Space Research*, V.11, N.8, p.289, Pergamon Press, Oxford.

- 9 **The First Soft Gamma-Ray Image Of The Galactic Centre With Arcmin Accuracy.**
B. Cordier, A. Goldwurm, P. Laurent, F. Lebrun, L. Natalucci, P. Mandrou, J.P. Roques, G. Vedrenne, A. Diachkov, S. Iounin, N. Khavenson, A. Kouznetov, B. Novikov, R. Sunyaev, D. Stepanov, I. Tchoukov, 1991, Conf. Proc. COSPAR XXVIII Symp. ME.8, *Advances in Space Research*, V. 11, N.8, p.177, Pergamon Press, Oxford.

- 10 **X-Gamma-Ray Observation Of The Crab Pulsar With The Sigma Telescope.**
Natalucci L., Bouchet L., Denis M., Goldwurm A., Laurent P., Lebrun F., Mereghetti S., Salotti L., Sunyaev R., Stepanov D., Iounin S., Tchoukov I., Koutnesov A., Diachkov A., Khavenson N., & Novikov,
1991, Conf. Proc. COSPAR XXVIII Symp. ME.8, *Advances in Space Research*, V.11, N.8, p.79, Pergamon Press, Oxford.

- 11 **The Soft Gamma-Ray Sources Identified By Sigma In The Galactic Center Region.**
J. Paul, B. Cordier, A. Goldwurm, F. Lebrun, P. Mandrou, J.P. Roques, G. Vedrenne, L. Bouchet, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Kouznetov, R. Sunyaev, I. Chulkov, A. Diachkov, N. Khavenson, B. Novikov,
1991, Proc. of the AIP Symposium on "Gamma-ray Line Astrophysics", Saclay, Eds. Ph. Durouchoux & N. Prantzos, (New York:AIP), p.17.

- 12 **Observations Of 4u1700-377 With The Sigma Telescope.**
P. Laurent, A. Goldwurm, F. Lebrun, J. Paul, S. Mereghetti, D. Barret, L. Bouchet, J.P. Roques, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Kouznetov, R. Sunyaev, I. Chulkov, A. Diachkov, N. Khavenson, B. Novikov,
1991, Proc. of the AIP Symposium on "Gamma-ray Line Astrophysics", Saclay, Eds. Ph. Durouchoux & N. Prantzos, (New York:AIP), p.346.

- 13 **Sigma Results On The Fast Variability Of Cig X-1 In The Hard X-Ray/Gamma-Ray Energy Band.**
S. Mereghetti, S. Bonazzola, P. Mandrou, J.P. Roques, L. Salotti, B. Cordier, A. Goldwurm, A. Lambert, D. Barret, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Kouznetov, R. Sunyaev, I. Chulkov, A. Diachkov, N. Khavenson, B. Novikov,
1991, Proc. of the AIP Symposium on "Gamma-ray Line Astrophysics", Saclay, Eds. Ph. Durouchoux & N. Prantzos, (New York:AIP), p.355.

- 14 **Sigma A Soft Gamma-Ray Imaging Telescope In-Flight Performances.**
P. Mandrou, J.P. Chabaud, M. Ehanno, J. Landé, M. Niel, J.P. Roques, G. Rouaix, P. Souleille, J. Paul, J. Ballet, M. Cantin, B. Cordier, A. Goldwurm, P. Laurent, F. Lebrun & J.P. Leray,
1991, Proc. of the AIP Symposium on "Gamma-ray Line Astrophysics", Saclay, Eds. Ph. Durouchoux & N. Prantzos, (New York:AIP), p.492.

- 15 **Activity Of Our Galactic Center And Discovery Of e^+e^- Features In The Spectra Of Two Hard X-Ray Sources.**
R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, M. Pavlinsky, S. Grebenev, I. Dekhanov, N. Khavenson, A.

Dyackov, B. Cordier, A. Goldwurm, F. Lebrun, J. Paul, L. Bouchet, P. Mandrou, J.P. Roques, G. Vedrenne,
1991, *Proc. of 28th Yamada Conference on "Frontiers of X-ray Astronomy"*, Nagoya 1991.

- 16 **Sigma/Granat Soft Gamma-Ray Observation Of The X-Ray Nova In Musca: Discovery Of Positron Annihilation Emission Line.**
A. Goldwurm, J. Ballet, B. Cordier, J. Paul, M. Denis, D. Barret, L. Bouchet, J.P. Roques, Sunyaev R., Churazov E., Gilfanov M., Pavlinsky M., Grebenev S., Dyachkov A., Khavenson N., Novikov B.,
1991 *Conf. Proc. of Musca Nova 91 Workshop*, Lyngby (Denmark), ed. S. Brandt, p.91.
- 17 **Observations Of Nova Muscae With Granat/Sigma: Hard X-Ray Spectral Properties And Discovery Of Narrow Annihilation Line In The Spectrum.**
M. Gilfanov, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Pavlinsky, S. Grebenev, A. Dyachkov, N. Khavenson, B. Novikov, A. Goldwurm, J. Ballet, B. Cordier, J. Paul, M. Denis, D. Barret, L. Bouchet, J.P. Roques,
1991 *Conf. Proc. of Musca Nova 91 Workshop*, Lyngby (Denmark), ed. S. Brandt, p.51.
- 18 **Sigma Observations Of The Galactic Center.**
B. Cordier, J. Ballet, A. Goldwurm, J. Paul, L. Bouchet, J.P. Roques, P. Mandrou, G. Vedrenne, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Dyackov, N. Khavenson, I. Chulkov, A. Kuznetzov, B. Novikov,
1991, *Conf. Proc. of the 21st IAU General Assembly*, 1991, Buenos Aires.
- 19 **In Orbit Performances Of The Hard X-Ray/Soft Gamma-Ray Telescope Sigma On Board The Soviet Spacecraft Granat.**
J.P. Leray, J. Ballet, A. Goldwurm, F. Lebrun, J. Paul, F. Lei, P. Mandrou, L. Bouchet, J.P. Roques, M. Niel,
1991, *Proc. of the 22nd I.C.R.C. Conf.* (Dublin), V.2, p.495.
- 20 **Sigma Observation Of The Sky Region Containing 3C 273.**
L. Bassani, E. Jourdain, L. Bouchet, J.P. Roques, J. Ballet, A. Claret, F. Lebrun, A. Goldwurm, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, M. Pavlinsky, S. Grebenev, I. Dekhanov, A. Kuznetzov, N. Yamburenko,
1991, *Proc. of the 22nd I.C.R.C. Conf.* (Dublin), V.1, p.173.
- 21 **High Energy X-Ray Observations Of GX 1+4 With The Sigma Telescope.**
M. Denis, D. Barret, E. Jourdain, J.P. Roques, L. Salotti, B. Cordier, A. Goldwurm, A. Claret, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, M. Pavlinsky, S. Grebenev, I. Dekhanov, A. Kuznetzov, N. Yamburenko,
1991, *Proc. of the 22nd I.C.R.C. Conf.* (Dublin), V. 1, p.161.
- 22 **New Sigma Observation Of GRS 1724-308: A Hard X-Ray Source In The Globular Cluster Terzan 2.**
D. Barret, S. Mereghetti, J.P. Roques, P. Mandrou, F. Lebrun, L. Salotti, B. Cordier, A. Goldwurm, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, M. Pavlinsky, S. Grebenev, I. Dekhanov, A. Kuznetzov, N. Yamburenko,
1991, *Proc. of the 22nd I.C.R.C. Conf.* (Dublin), V.1, p.157.

1993

- 23 **SIGMA Observations of the Burst Source GX 354-00.**
A. Goldwurm, A. Claret, B. Cordier, J. Paul, J.-P. Roques, L. Bouchet, M.-C. Schmitz-Fraysse, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, N. Khavenson, A. Dyachkov, B. Novikov, R. Kremnev & V. Kovtunenkov,
1993, *Proceedings of the Arthur Holly Compton Centennial Symposium on Gamma-Ray Astronomy, AIP Conference Proceedings* 280, Compton Gamma-Ray Observatory, éd. M. Friedlander, N. Gehrels & D.J.

Macomb, (New York: American Institute of Physics), p. 366

- 24 Hard X-Ray Spectral Properties and Discovery of Narrow Annihilation Line in the Spectrum of Nova Muscae.**
M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, S. Grebenev, M. Pavlinsky, A. Dyachkov, V. Kovtunenkov, R. Kremnev, A. Goldwurm, J. Ballet, P. Laurent, J. Paul, E. Jourdain, M.-C. Schmitz-Fraysse, J.-P. Roques, & P. Mandrou,
1993, Proceedings of the 29th COSPAR Meeting, Washington, 1992, Gamma Ray Astronomy, eds. G.G.C. Palumbo & G.F. Bignami, (Oxford: Pergamon Press), *Advances in Space Research*, Vol. 13, N. 12, p. 695.
- 25 SIGMA Observations of two New Hard X-Ray and Soft Gamma-Ray Transients: GX 354-0 and Nova Persei.**
A. Claret, J. Ballet, A. Goldwurm, F. Lebrun, J.-P. Roques, L. Bouchet, M.-C. Schmitz-Fraysse, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, N. Khavenson, A. Dyachkov, B. Novikov, R. Kremnev, & V. Kovtunenkov
1993, Proceedings of the 29th COSPAR Meeting, Washington, 1992, Gamma Ray Astronomy, eds. G.G.C. Palumbo & G.F. Bignami, (Oxford: Pergamon Press), *Advances in Space Research*, Vol. 13, N. 12, p. 735.
- 26 SIGMA Observations of the Soft Gamma-Ray Source GRS 1758-258**
P. Laurent, B. Cordier, A. Goldwurm, J. Paul, J.-P. Roques, L. Bouchet, M. Denis, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, N. Khavenson, B. Novikov, A. Dyachkov, R. Kremnev, & K. Sukhanov,
1993, Proceedings of the 29th COSPAR Meeting, Washington, 1992, Gamma Ray Astronomy, eds. G.G.C. Palumbo & G.F. Bignami, (Oxford: Pergamon Press), *Advances in Space Research*, V. 13, N. 12, p. 751.
- 27 Observation of the X-ray Transient GRS 1716-249 (Nova Oph 1993) with GRANAT/SIGMA. Preliminary Results.**
M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, A. Vikhlinin, A. Finogenov, A. Sitdikov, A. Dyachkov, N. Khavenson, J. Ballet, B. Cordier, A. Goldwurm, P. Laurent, J.-P. Roques, P. Mandrou, M. Niel, & G. Vedrenne,
1993, *Proceedings of the 4th Annual Astrophysics Conference*, Maryland.

1994

- 28 The Hard X-Ray Binary Source GRS 1758-258 in the Galactic Center Region.**
S. Mereghetti, T. Belloni & A. Goldwurm,
1994, *Mem. S.A.It.*, Vol. 65, p. 317.
- 29 SIGMA/GRANAT Results on Weak Sources of Hard X-Rays in the Galactic Center**
A. Goldwurm, B. Cordier, J. Paul, P.-O. Petrucci, J.-P. Roques, P. Mandrou, L. Bouchet, G. Vedrenne, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Dyachkov, N. Khavenson, V. Kovtunenkov, R. Kremnev, & K. Sukhanov,
1994, Proceedings of the 2nd Compton Symp., College Park, AIP (eds. C.E. Fichtel, N. Gehrels, & J.P. Norris, New York), V. 304, p. 421.
- 30 SIGMA/GRANAT Deep Survey of the Galactic Center Region.**
B. Cordier, J. Paul, J. Ballet, A. Goldwurm, P. Mandrou, J.-P. Roques, G. Vedrenne, M. Niel, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Dyachkov, N. Khavenson, V. Kovtunenkov, R. Kremnev, & K. Sukhanov,
1994, Proceedings of the 2nd Compton Symp., College Park, AIP (eds. C.E. Fichtel, N. Gehrels, & J.P. Norris, New York), Vol. 304, p. 446.

- 31 Review of Galactic Center Observation with GRANAT.**
E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, S. Grebenev, M. Markevich, M. Pavlinsky, A. Dyachkov, N. Khavenson, B. Cordier, A. Goldwurm, F. Lebrun, J. Paul, J.-P. Roques, P. Mandrou, L. Bouchet, I. Mallet,
1994, Proceedings of the 27th ESLAB Symposium, Noordwijk, 1993, Astrophysics and Space Science Library, Vol. 187, Frontiers of Space and Ground Based-Astronomy, éd. W. Wamsteker, M.S. Longair et Y. Kondo (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers), p. 35.
- 32 Spectral and Temporal Properties of Black Hole Candidates.**
M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, A. Vikhlinin, A. Finogenov, N. Khavenson, A. Dyachkov, V. Kovtunencko, P. Laurent, J. Ballet, A. Goldwurm, A. Claret, J.-P. Roques, P. Mandrou, M. Niel & G. Vedrenne,
1994, *Proceedings of the International Conference on X-Ray Astronomy*, Tokyo, 1994, Frontiers Science Series No. 12, New Horizon of X-Ray Astronomy Å First Results from ASCA, éd. F. Makino et T. Ohashi (Tokyo: Universal Academy Press, Inc.), p. 433.
- 33 Averaged Picture of the GC Region in Hard X-Rays.**
E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Vikhlinin, A. Finogenov, N. Khavenson, A. Dyachkov, V. Kovtunencko, B. Cordier, J. Paul, A. Goldwurm, P. Laurent, J.-P. Roques, P. Mandrou, M. Niel & G. Vedrenne,
1994, *Proceedings of the International Conference on X-Ray Astronomy*, Tokyo, 1994, Frontiers Science Series No. 12, New Horizon of X-Ray Astronomy Å First Results from ASCA, éd. F. Makino et T. Ohashi (Tokyo: Universal Academy Press, Inc.), p. 491.
- 34 SIGMA/GRANAT Deep Imaging Survey of the Galactic Center in Hard X-Rays**
A. Goldwurm, B. Cordier, J. Ballet, J. Paul, P. Mandrou, J.-P. Roques, G. Vedrenne, M. Niel, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Dyachkov, N. Khavenson, V. Kovtunencko, R. Kremnev & K. Sukhanov,
1994, *Proceedings of the International Conference on X-Ray Astronomy*, Tokyo, 1994, Frontiers Science Series No. 12, New Horizon of X-Ray Astronomy Å First Results from ASCA, éd. F. Makino et T. Ohashi (Tokyo: Universal Academy Press, Inc.), p. 495.

1995

- 35 Hard X-Ray Observations of Black Hole Candidates.**
M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, A. Vikhlinin, A. Finogenov, A. Sitdikov, A. Dyachkov, N. Khavenson, P. Laurent, J. Ballet, A. Claret, A. Goldwurm, J.-P. Roques, P. Mandrou, M. Niel & G. Vedrenne,
1995, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on the Lives of the Neutron Stars, Kemer, 1993, *NATO ASI Series*, Series C: Mathematical and Physiscal Sciences - Vol. 450, The Lives of the Neutron Stars, éd. M.A. Alpar, Ü. Kizilo_lu et J. van Paradijs, (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers), p. 331.
- 36 SIGMA Observations of the Low-Mass X-Ray Binaries of the Galactic Bulge.**
A. Goldwurm, M. Denis, J. Paul, S. Faisse, J.-P. Roques, L. Bouchet, G. Vedrenne, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Finogenov, A. Vikhlinin, A. Dyachkov, N. Khavenson & V. Kovtunencko,
1995, Proceedings of the 30th COSPAR Meeting, Hamburg, 1994, Gamma Ray Astronomy, éd. N. Gehrels, (Oxford: Pergamon Press), *Advances in Space Research*, Vol. 15, N°5, p. (5)41.
- 37 SIGMA Survey of the Galactic Bulge Region.**
J. Paul, A. Goldwurm, M. Vargas, J. Ballet, J.-P. Roques, L. Bouchet, G. Vedrenne, P. Mandrou, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Finogenov, A. Vikhlinin, A. Dyachkov, N. Khavenson & V.

Kovtunenکو,

1995, *Proceedings of the 17th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*, Munich, 1994, *Annals of The New York Academy of Sciences*, éd. H. Böhringer, G.E. Morfill et J. Trümper (New York: The New York Academy of Sciences), Vol. 759, p. 312.

1996

- 38 Two Distinct Modes in the Low (Hard) State of Cygnus X-1 and 1E 1740.7-2942.**
S. Kuznetsov, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, A. Vikhlinin, N. Khavenson, A. Dyachkov, P. Laurent, A. Goldwurm, B. Cordier, M. Vargas, P. Mandrou, J.-P. Roques, E. Jourdain & V. Borrel, 1996, *Proceedings of the International Conference on X-ray Astronomy and Astrophysics*, Würzburg, 1995, *MPE Report* 263, *Röntgenstrahlung from the Universe*, éd. H. U. Zimmermann, J. E. Trümper et H. Yorke (Garching: Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik), p. 157.
- 39 Hard X-Ray Observations of X-Ray Nova Ophiuchi 1993 (GRS 1716-249) with GRANAT/SIGMA.**
M. Revnivtsev, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, K. Borozdin, N. Alexandrovich, N. Khavenson, I. Chulkov, A. Goldwurm, J. Ballet, M. Denis, P. Laurent, P. Mandrou, J.-P. Roques, E. Jourdain & V. Borrel, 1996, *Proceedings of the International Conference on X-ray Astronomy and Astrophysics*, Würzburg, 1995, *MPE Report* 263, *Röntgenstrahlung from the Universe*, éd. H. U. Zimmermann, J. E. Trümper et H. Yorke (Garching: Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik), p. 185.
- 40 Hard X-Ray Observations of GRS/KS 1730-312) with GRANAT/SIGMA.**
S. Trudolyubov, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, K. Borozdin, N. Alexandrovich, N. Khavenson, B. Novikov, M. Vargas, A. Goldwurm, J. Paul, M. Denis, P. Mandrou, J.-P. Roques, E. Jourdain & V. Borrel, 1996, *Proceedings of the International Conference on X-ray Astronomy and Astrophysics*, Würzburg, 1995, *MPE Report* 263, *Röntgenstrahlung from the Universe*, éd. H. U. Zimmermann, J. E. Trümper et H. Yorke (Garching: Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik), p. 201.
- 41 The γ -Ray Sky as Seen by the SIGMA Telescope.**
A. Goldwurm, 1996, *Proceedings of the Symposium on "Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources"*, Vulcano, 22-27 Mai 1995, *Mem. S.A.It.*, Vol. 67, N. 1/2, p. 121.
- 42 ISGRI : a CdTe Array Imager for INTEGRAL.**
Lebrun F., Blondel C., Fondeur I., Goldwurm A., Laurent P., Leray J.-P., 1996, *SPIE*, V. 2806, p. 258.
- 43 Imager Onboard INTEGRAL.**
Ubertini P., DiCocco G., Lebrun F., Bassani L., Bazzano A., Bird A.J., Broendstadt K., Caroli E., Denis M., Goldwurm A., Labanti C., Laurent P., Malaguti G., Mirabel F., Natalucci L., Quadrini M., Ramsey B.D., Reglero V., Sabau L., Sacco B., Staubert R., Vigroux L., Weisskopf M.C., Zdziarski A., Zehnder A., 1996, *SPIE*, V.2806, p.246.
- 44 Six Years of Hard X-Ray and Soft γ -Ray Observations of the Galactic Center with the Sigma Telescope.**
M. Vargas, A. Goldwurm, J. Paul, J. Ballet, L. Bouchet, J.-P. Roques, E. Jourdain, V. Borrel, R. Sunyaev, M. Gilfanov, E. Churazov, S. Kuznetsov, S. Trudolyubov, M. Revnivtsev, N. Khavenson & A. Dyachkov, 1996, *Proceedings of the 4th ESO/CTIO Workshop*, La Silla, 1996, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, The Galactic Center, éd. R. Gredel (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), V. 102, p. 431.

- 45 SIGMA Observations of High Energy Steady Sources and Transient in the Milky Way.**
M. Vargas, J. Paul, A. Goldwurm, P. Laurent, E. Jourdain, J.-P. Roques, V. Borrel, L. Bouchet, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, B. Novikov, A. Dyachkov, N. Khavenson, K. Sukhanov & N. Kuleshova,
1997, *ESA SP-382*, Proceedings of the 2nd INTEGRAL Workshop, St. Malo - France , 16-20 September 1996, *The Transparent Universe*, éd. C. Winkler, T.J-L. Courvoisier & P. Durouchoux, p. 129.
- 46 SIGMA/GRANAT Observations of the X-Ray Transient KS/GRS 1730-312 in Scorpius.**
S. Trudolyubov, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, K. Borozdin, N. Aleksandrovich, N. Khavenson, B. Novikov, M. Vargas, A. Goldwurm, J. Paul, M. Denis, V. Borrel, L. Bouchet, E. Jourdain & J.-P. Roques,
1997, *ESA SP-382*, Proceedings of the 2nd INTEGRAL Workshop, St. Malo - France , 16-20 September 1996, *The Transparent Universe*, éd. C. Winkler, T.J-L. Courvoisier & P. Durouchoux, p. 269.
- 47 Hard X-Ray Observations of X-Ray Nova Ophiuchi 1993 (GRS 1716-249) with GRANAT/SIGMA.**
M. Revnivtsev, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, K. Borozdin, N. Alexandrovich, N. Khavenson, I. Chulkov, A. Goldwurm, J. Ballet, M. Denis, P. Laurent, J.-P. Roques, V. Borrel, L. Bouchet & E. Jourdain,
1997, *ESA SP-382*, Proceedings of the 2nd INTEGRAL Workshop, St. Malo - France , 16-20 September 1996, *The Transparent Universe*, éd. C. Winkler, T.J-L. Courvoisier & P. Durouchoux, p. 273.
- 48 Detection of Hard X-Ray Emission from the X-Ray Burster 4U 1705-44 with SIGMA/GRANAT.**
M. Revnivtsev, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, K. Borozdin, N. Alexandrovich, N. Khavenson, A. Dyachkov, M. Vargas, J. Paul, A. Goldwurm, P. Laurent, E. Jourdain, J.-P. Roques, V. Borrel & L. Bouchet,
1997, *ESA SP-382*, Proceedings of the 2nd INTEGRAL Workshop, St. Malo - France , 16-20 September 1996, *The Transparent Universe*, éd. C. Winkler, T.J-L. Courvoisier & P. Durouchoux, p. 277.
- 49 ASCA Results on the Hard X-Ray Black Hole Candidate GRS 1758-258.**
S. Mereghetti, D.I. Cremonesi, F. Hardt, T. Murakami, T. Belloni, A. Goldwurm,
1997, *ESA SP-382*, Proceedings of the 2nd INTEGRAL Workshop, St. Malo - France , 16-20 September 1996, *The Transparent Universe*, éd. C. Winkler, T.J-L. Courvoisier & P. Durouchoux, p. 171.
- 50 SIGMA Observations of X-Ray Novae.**
A. Goldwurm, M. Vargas, P. Goldoni, P. Laurent,
1997, *Proceedings of the XXV I.C.R.C. Symposium*, session OG 3.1 "Gamma-Rays from Space Observations, Galactic Sources", 30 July-6 August 1997, Durban (South Africa), Vol. 3, OG 3.1.1, p. 81.
- 51 Imaging Simulations of the Hard X-Ray/Soft Gamma-Ray Telescope On Board the INTEGRAL Observatory.**
A. Goldwurm, P. Goldoni, P. Laurent, F. Lebrun,
1997, *Proceedings of the XXV I.C.R.C. Symposium*, session OG 10.5 "Techniques, Computing and Data Acquisition", 30 July-6 August 1997, Durban (South Africa), Vol. 5, OG 10.5.9, p. 309.
- 52 The IBIS Telescope on Board INTEGRAL.**
G. Di Cocco, P. Ubertini, F. Lebrun, L. Bassani, A. Bazzano, T.J. Bird, K. Broenstad, E. Caroli, M. Denis, A. Goldwurm, C. Labanti, P. Laurent, G. Malaguti, F. Mirabel, L. Natalucci, M. Quadri, B. Ramsey, V. Reglero, L. Sabau, B. Sacco, A. Spizzichino, R. Staubert, J.B. Stephen, L. Vigroux, M.C. Weisskopf, A. Zdziarski, A. Zehnder,
1997, *Proceedings of the XXV I.C.R.C. Symposium*, session OG 10.2 "Space Instrumentation", 30 July-6 August 1997, Durban (South Africa), Vol. 5, OG 10.2.5, p. 33.

- 53 LMXBS and Black Hole Candidates in the Galactic Center Region.**
E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, B.S. Novikov, I. Chulkov, V. Kovtunenkov, A. Sheikhet, K. Sukhanov, A. Goldwurm, B. Cordier, J. Paul, J. Ballet, E. Jourdain, J.-P. Roques, L. Bouchet, P. Mandrou,
1997, *Avances in Space Research*, V.19, p.55.
- 54 GRANAT/SIGMA Observations of X-Ray Nova Persei 1992.**
A. Finougenov, M. Gilfanov, E. Churazov, R. Sunyaev, A. Vikhlinin, A. Dyachkov, V. Kovtunenkov, R. Kremnev, M. Denis, J. Ballet, A. Goldwurm, P. Laurent, E. Jourdain, J.-P. Roques, L. Bouchet, P. Mandrou,
1997, *Avances in Space Research*, V. 19, p.35.
- 55 The IBIS View of the Galactic Center: INTEGRAL's Imager Observations Simulations.**
P. Goldoni, A. Goldwurm, P. Laurent, F. Lebrun,
1997, Proceedings of the 4th Compton Symposium, 27-30 April 1997, Williamsburg (VA-U.S.), eds. C.D. Dermer, M.S. Strickman and J.D. Kurfess, (New York) *AIP* 410, p.1549.
- 56 Hard X-Ray Observations of GRS 1009-45 with the SIGMA Telescope.**
P. Goldoni, M. Vargas, A. Goldwurm, P. Laurent, E. Jourdain, J.-P. Roques, V. Borrel, L. Bouchet, M. Revnivtsev, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Dyachkov, N. Khavenson, N. Tserenin, N. Kuleshova,
1997, Proceedings of the 4th Compton Symposium, 27-30 April 1997, Williamsburg (VA-U.S.), eds. C.D. Dermer, M.S. Strickman and J.D. Kurfess, (New York) *AIP* 410, p.957.

1999

- 57 Hard X-Rays from the Galactic Nucleus : Present and Future Observations.**
A. Goldwurm, P. Goldoni, P. Laurent, F. Lebrun,
1999, *Conf. Proc. of the 19th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics and Cosmology*, 14-18 December 1998, Paris, France.
- 58 GRANAT/Sigma Observations Of Early Afterglows From Gamma-Ray Bursts In Soft Gamma-Rays.**
Pelaez, F. A., Jourdain, E., Roques, J. P., Vedrenne, G., Burenin, R. A., Vikhlinin, A. A., Gilfanov, M. R., Terekhov, O. V., Tkachenko, A. Y., Sazonov, S. Y., Churazov, E. M., Sunyaev, R. A., Goldoni, P., Claret, A., Goldwurm, A., Paul, J.,
1999, *American & Astronomical Society Meeting*, AAS, 194.0301.
- 59 Imaging Simulations of the Galactic Nucleus with the IBIS Gamma-Ray Telescope onboard INTEGRAL.**
A. Goldwurm, P. Goldoni, P. Laurent, F. Lebrun,
1999, *Conf. Proc. of the 3th INTEGRAL Workshop "The Extreme Universe"*, 14-18 September 1998, Taormina, Italy, *Astr. Lett. & Comm.*, Vol. 38, N.1-6, Part I, 333.
- 60 Deep SIGMA Observations of the Central Square Degree of the Galaxy.**
Goldoni, P., Goldwurm, A., Lebrun, F., Paul, J., Roques, J.-P., Jourdain, E., Bouchet, L., Mandrou, P., Churazov, E. M., Gilfanov, M., Sunyaev, R. A., D'yachkov, A. V., Khavenson, N. G., Sukhanov, K. M.,
1999, *Conf. Proc. of the 3th INTEGRAL Workshop "The Extreme Universe"*, 14-18 September 1998, Taormina, Italy, *Astr. Lett. & Comm.*, Vol. 38, N.1-6, Part I, 305.
- 61 Hard X-Ray Detection of XTE J1755-324 with the SIGMA Telescope.**
Goldoni, P., Vargas, M., Goldwurm, A., Paul, J., Borrel, V., Jourdain, E., Bouchet, L., Roques, J.-P., Revnivtsev, M., Churazov, E. M., Gilfanov, M., Sunyaev, R. A., D'yachkov, A. V., Khavenson, N. G., Tserenin, I. D., Kuleshova, N.,

1999, *Conf. Proc. of the 3th INTEGRAL Workshop "The Extreme Universe"*, 14-18 September 1998, Taormina, Italy, Astr. Lett. & Comm., Vol. 38, N.1-6, Part I, 329.

62 Nature of the Galactic Soft Gamma-Ray Emission.

F. Lebrun, P. Goldoni, A. Goldwurm, P. Laurent, O. Limousin, J. Paul, 1999, *Conf. Proc. of the 3th INTEGRAL Workshop "The Extreme Universe"*, 14-18 September 1998, Taormina, Italy, Astr. Lett. & Comm., Vol. 38, N.1-6, Part I, 457.

63 The Gamma-Ray Imager on Board INTEGRAL

P. Ubertini, F. Lebrun, G. Di Cocco, A. Bazzano, A.J. Bird, K. Broenstad, E. Caroli, A. Goldwurm, C. Labanti, P. Laurent, I. F. Mirabel, L. Natalucci, M.E. Quadrini, V. Reglero, L. Sabau, B. Sacco, R. Staubert, L. Vigroux, M.C. Weisskopf, A. Zdziarski, A. Zehnder and L. Bassani, 1999, *Conf. Proc. of the 3th INTEGRAL Workshop "The Extreme Universe"*, 14-18 September 1998, Taormina, Italy, Astr. Lett. & Comm., Vol. 38, N.1-6, Part II, 331.

2000

64 Observation of X-ray Novae with INTEGRAL

A. Goldwurm, P. Goldoni, P. Laurent, F. Lebrun, 2000, *Conf. Proc. of the 5th GRO Compton Symposium*, 15-17 September 1999, Portsmouth, NH (USA), AIP, 510, 703.

65 The IBIS Gamma-Ray Telescope on INTEGRAL

Ubertini, P., Lebrun, F., di Cocco, G., Bassani, L., Bazzano, A., Bird, A. J., Broenstad, K., Caroli, E., Cocchi, M., de Cesare, G., Denis, M., de Cosimo, S., di Lellis, A., Gianotti, F., Goldoni, P., Goldwurm, A., La Rosa, G., Labanti, C., Laurent, P., Limousin, O., Malaguti, G., Mirabel, I. F., Natalucci, L., Orleansky, P., Poulsen, M. J., Quadrini, M., Ramsey, B., Reglero, V., Sabau, L., Sacco, B., Santangelo, A., Segreto, A., Staubert, R., Stephen, J., Trifoglio, M., Vigroux, L., Volkmer, R., Weisskopf, M. C., Zdziarski, A., 2000, *Conf. Proc. of the 5th GRO Compton Symposium*, 15-17 September 1999, Portsmouth, NH (USA), AIP, 510, 684.

2001

66 IBIS/INTEGRAL Galactic Plane Observations: X-ray Novae

P. Goldoni, A. Goldwurm, P. Laurent, F. Lebrun 2001, *Conf. Proc. of "X-ray astronomy : stellar endpoints, AGN, and the diffuse X-ray background"*, Bologna, Italy, 6-10 September 1999. Published by Melville, NY: American Institute of Physics, 2001. xvii, 1041 p. Edited by Nicholas E. White, Giuseppe Malaguti, and Giorgio G.C. Palumbo, AIP, Vol. 599. ISBN 0735400431, p.630.

67 The Center of our Galaxy : Activity and High-Energy Emission of the Closest Massive Black Hole.

A. Goldwurm, 2001, *Conf. Proc. of the 4th INTEGRAL Workshop "Exploring the Gamma-Ray Universe"*, 4-8 Sep 2000, Alicante, Spain, Eds. A. Gimenez V. Reglero C. Winkler, ESA SP - 459, 455.

68 Gamma-Ray Imaging with the Coded Mask IBIS Telescope.

A. Goldwurm, P. Goldoni, A. Gros, J. Stephen, L. Foschini, F. Gianotti, L. Natalucci, G. De Cesare, M. Del Santo 2001, *Conf. Proc. of the 4th INTEGRAL Workshop "Exploring the Gamma-Ray Universe"*, 4-8 Sep 2000, Alicante, Spain, Eds. A. Gimenez V. Reglero & C. Winkler, ESA SP - 459, 497.

69 INTEGRAL Observations of Galaxy Clusters.

P. Goldoni, A. Goldwurm, P. Laurent, et al.

2001, *Conf. Proc. of the 4th INTEGRAL Workshop “Exploring the Gamma-Ray Universe”*, 4-8 Sep 2000, Alicante, Spain, Eds. A. Gimenez V. Reglero & C. Winkler, ESA SP - 459, 165.

- 70 ISGRI: the CdTe Gamma-Ray Camera onboard INTEGRAL**
F. Lebrun, J.P. Leray, O. Limousin, C. Blondel, P. Laurent, P. Goldoni, A. Goldwurm, A. Sauvageon
2001, *Conf. Proc. of the 4th INTEGRAL Workshop “Exploring the Gamma-Ray Universe”*, 4-8 Sep 2000, Alicante, Spain, Eds. A. Gimenez V. Reglero & C. Winkler, ESA SP - 459, 591.
- 71 INTEGRAL/IBIS Observations of Persistent Black Hole Spectral States during the Core Program**
P. Laurent, P. Goldoni, A. Goldwurm, F. Lebrun
2001, *Conf. Proc. of the 4th INTEGRAL Workshop “Exploring the Gamma-Ray Universe”*, 4-8 Sep 2000, Alicante, Spain, Eds. A. Gimenez V. Reglero & C. Winkler, ESA SP - 459, 505.
- 72 Observations of Black Hole X-Ray Novae in Outburst with INTEGRAL.**
P. Goldoni, A. Goldwurm, P. Laurent, et al.
2001, *Conf. Proc. of the 4th INTEGRAL Workshop “Exploring the Gamma-Ray Universe”*, 4-8 Sep 2000, Alicante, Spain, Eds. A. Gimenez V. Reglero & C. Winkler, ESA SP - 459, 573.
- 73 XMM-Newton Observations of the Black Hole Microquasar GRS 1758-258.**
A. Goldwurm, D. Israel, P. Goldoni, P. Ferrando, A. Decourchelle, F. Mirabel, R.S. Warwick,
2001, *Conf. Proc. of the Symposium “Gamma 2001”*, 4-6 April 2001, Baltimore, U.S.A., Eds. S. Ritz, N. Gehrels & C. Shrader, AIP, 587, 61.

2002

- 74 The September 2000 Intermediate State of the Galactic Microquasar GRS 1758-258.**
P. Goldoni, A. Goldwurm, P. Ferrando, R.S. Warwick, A. Decourchelle, J. Miller
2002, *Conf. Proc. of the Symposium “The Multi Color Universe”*, 11-14 September 2001, Mumbai, India, ed. R.K. Machanda & B. Paul, Ebenezer Printing House, Dadar, Mumbai, India, p. 96.
- 75 The IBIS/ISGRI telescope onboard INTEGRAL.**
P. David, O. Limousin, P. Laurent, P. Goldoni, A. Goldwurm, J. Paul, F. Lebrun
2002, *Conf. Proc. of the Symposium “The Multi Color Universe”*, 11-14 September 2001, Mumbai, India, ed. R.K. Machanda & B. Paul, Ebenezer Printing House, Dadar, Mumbai, India, p. 310.
- 76 XMM-Newton Observations of the Black Hole Microquasar GRS 1758-258**
A. Goldwurm, P. Ferrando, P. Goldoni, J. Miller, A. Decourchelle, F. Mirabel, R.S. Warwick,
2002, *Conf. Proc. of the Workshop “XMM-Newton”*, 28-30 November 2001, Noordwijk, The Netherlands, ESA - ESP 488.
- 77 High Energy Emission from Galactic Black Hole Systems**
A. Goldwurm
2002, *Conf. Proc. of the 22nd Astrophysics Moriond Meeting “The Gamma Ray Universe”*, 9-16 March 2002, Les Arcs, Savoie, France, Eds. A. Goldwurm, D. Neumann & J. Trần Thanh Vân, Thê Giới Publishers, Vietnam, p. 25.
- 78 IBIS/ISGRI Data and Analysis**
P. Goldoni, P. David, A. Goldwurm, A. Gros, P. Laurent, F. Lebrun
2002, *Conf. Proc. of the 22nd Astrophysics Moriond Meeting “The Gamma Ray Universe”*, 9-16 March 2002, Les Arcs, Savoie, France, Eds. A. Goldwurm, D. Neumann & J. Trần Thanh Vân, Thê Giới Publishers, Vietnam, p. 435.

2003

- 79 A New X-ray Flare from the Galactic Nucleus detected with XMM-Newton**
A. Goldwurm, E. Brion, P. Goldoni, P. Ferrando, F. Daigne, P. Goldoni, A. Decourchelle, R.S. Warwick & P. Predehl
 2003, *Conf. Proc. of the Workshop "Galactic Center 2002: The Central 300 pc of our Galaxy"*, 3-8 Nov 2002, Kona, Hawaii, USA, *Astron. Nachr.*, Vol. 324, No. S1 (2003), Special Supplement "The central 300 parsecs of the Milky Way", Eds. A. Cotera, H. Falcke, T. R. Geballe, S. Markoff, p. 377.

2004

- 80 SIMBOL-X: a new generation hard X-ray telescope**
 P. Ferrando, M. Arnoud, B. Cordier, A. Goldwurm, O. Limousin, J. Paul, J.L. Sauvageot, P.O. Petrucci, M. Mouchet, G. Bignami, O. Citterio, S. Campana, G. Pareschi, G. Tagliaferri, U. Briel, G. Hasinger, L. Strueder, P. Lechner, E. Kendziorra, M. Turner
 2004, *Conf. Proc. SPIE 5168*, Aug 2003, San Diego, California, US, 65
- 81 The X-ray Flaring Activity of the Galactic Nucleus Observed with XMM-Newton**
 E. Brion, A. Goldwurm, P. Goldoni, P. Ferrando, F. Daigne, A. Decourchelle,
 2004, *Conf. Proc. of the Societe Francaise de Astronomie et Astrophysique 2003*, Juin 2003 Bordeaux, France, Eds. F. Combes, D. Barret & T. Contini, EDP-Sciences Conf. Series, 385.
- 82 INTEGRAL Detection of Hard X-Ray Emission from the Galactic Nucleus**
 G. Bélanger, A. Goldwurm, P. Goldoni, J. Paul,
 2004, *Conf. Proc. of the Societe Francaise de Astronomie et Astrophysique 2003*, Juin 2003 Bordeaux, France, Eds. F. Combes, D. Barret & T. Contini, EDP-Sciences Conf. Series, 377
- 83 SIMBOL-X and the Galactic Centre Region**
 P. Ferrando, A. Decourchelle, P. Goldoni, A. Goldwurm,
 2004, *Conf. Proc. of the Societe Francaise de Astronomie et Astrophysique 2003*, Juin 2003 Bordeaux, France, Eds. F. Combes, D. Barret & T. Contini, EDP-Sciences Conf. Series, 403
- 84 First results of IBIS observations of Compact Accreting Objects**
 P. Goldoni, A. Goldwurm, P. Laurent, F. Lebrun,
 2004, *Conf. Proc. of the Societe Francaise de Astronomie et Astrophysique 2003*, Juin 2003 Bordeaux, France, Eds. F. Combes, D. Barret & T. Contini, EDP-Sciences Conf. Series, 417
- 85 EPIC Detection of Sgr A* Flares**
 Goldoni P., Goldwurm A., Brion, E.; Ferrando, P.; Decourchelle, A.; Porquet, D.; Predehl, P.; Aschenbach, B.
 2004, *Conf. Proc. of EPIC Consortium Meeting 2003*, 14-16 October 2003, Palermo, Italy, Mem.S.A.It., 75, 425
- 86 XMM and INTEGRAL Detection of High-Energy Emission from the Galactic Nucleus**
A. Goldwurm
 2004, *Conf. Proc. of the 10th Marcel Grossman Meeting on Relativistic Astrophysics*, 20-26 July 2003, Rio de Janeiro, Brazil, Ed. M. Novello, S.P. Bergliaffa, R. Ruffini, 2005, Word Scientific Pub., 1263
- 87 INTEGRAL monitoring of the Black Hole candidate 1E 1740.7-2942**
 M. Del Santo, A. Bazzano, D. M. Smith, L. Bassani, A.J. Bird, L. Bouchet, M. Cadolle-Bel, F. Capitanio, G. De Cesare, M. Falanga, F. Frontera, P. Goldoni, A. Goldwurm, J. Huovelin, E. Kuulkers, N. Lund, G. Malaguti, A. Malizia, I. F. Mirabel, L. Natalucci, A. Paizis, J. Paul, V. Reglero, P. Ubertini, O. Vilhu, C. Winkler, A. Zdziarski

2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop 'The INTEGRAL Universe'*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 201

- 88 Contribution of point sources to the soft gamma-ray Galactic emission**
R. Terrier, F. Lebrun, G. Belanger, A Goldwurm, A. W. Strong, V. Schoenfelder, L. Bouchet, J.-P. Roques, A. Parmar
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop "The INTEGRAL Universe"*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 513.
- 89 Observations of the X-ray Transient EXO 2030+375 with IBIS/ISGRI**
S. Kuznetsov, M. Falanga, A Goldwurm and T. Di Salvo
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop "The INTEGRAL Universe"*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 285.
- 90 High energy emission from IGR J16320-4751**
L. Foschini, J.A. Tomsick, J. Rodriguez, R. Walter, A. Goldwurm, S. Corbel, P. Kaaret
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop "The INTEGRAL Universe"*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 247.
- 91 INTEGRAL/ XMM-Newton Observation of the Accreting Millisecond Pulsar XTE J1807-294 in Outburst**
M. Falanga, J. M. Bonnet-Bidaud, A. Martocchia, P. Goldoni, L. Kuiper, J. L. Qu, A. Goldwurm
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop "The INTEGRAL Universe"*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 289.
- 92 High Energy Behavior of the BHC IGR J 17464-3213**
F. Capitanio, P. Kretschmar, P. Ubertini, E.J. Barlow, A. Bazzano, S. Brandt,, A. Goldwurm, et al.,
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop 'The INTEGRAL Universe'*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 313.
- 93 First Results on X-Ray Bursters with INTEGRAL**
A. Bazzano, A.J. Bird, M. Cocchi, O. Vilhu, F. Capitanio,, A. Goldwurm, et al.,
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop 'The INTEGRAL Universe'*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 309.
- 94 INTEGRAL Observations of 4 NS LMXB**
R. Farinelli, F. Fronter, E. Virgili, M. Falanga, P. Goldoni, A. Goldwurm
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop "The INTEGRAL Universe"*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 317.
- 95 IBIS/ISGRI Cyg X-3 Monitoring During the INTEGRAL PV Phase**
P. Goldoni, M. Falanga, J. M. Bonnet-Bidaud, A. Goldwurm
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop "The INTEGRAL Universe"*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 325.
- 96 An INTEGRAL Observation of the Black Hole Transient 4U 1630--47 and the Norma Region of the Galaxy**
J.A. Tomsick, R. Lingenfelter, S. Corbel, A. Goldwurm, P. Kaaret
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop "The INTEGRAL Universe"*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 413

- 97 INTEGRAL, XMM-Newton and Rossi-XTE Observations of the State Transition of the X-ray Transient and Black Hole Candidate XTE J1720-318**
Cadolle Bel, M.; Goldwurm, A.; Rodriguez, J.; Sizun, P.; Corbel, S.; Goldoni, P.; Parmar, A. N.; Kuulkers, E.; del Santo, M.; Ubertini, P.; and 4 coauthors
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop "The INTEGRAL Universe"*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 215
- 98 The INTEGRAL View of the Galactic Nucleus**
A. Goldwurm, G. Bélanger, P. Goldoni, J. Paul, R. Terrier, M. Falanga, P. Ubertini, A. Bazzano, M. Del Santo, C. Winkler, A.N. Parmar, E. Kulkeers, K. Ebisawa, J.P. Roques, N. Lund, F. Melia, G. Skinner, F. Yusef-Zadeh
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop "The INTEGRAL Universe"*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 237, astro-ph/0407264
- 99 Integral observation of Cyg X-1 in an intermediate**
J. Malzac, P.O. Petrucci, E. Jourdain, P. Sizun, M. Cadolle, G. Pooley, C. Cabanac, S. Chaty, T. Belloni, J. Rodriguez, J.P. Roques, P. Durouchoux, A. Goldwurm, P. Laurent
2004, *Conf. Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop "The INTEGRAL Universe"*, Munich, 16-20 February 2004. ESA SP-552, 341
- 100 The INTEGRAL Science Data Center**
R. Walter, Aubord, . . . , A. Goldwurm, et al.
2004, *Conf. Proc. of Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XIII*, 12-15 October, 2003 in Strasbourg, France, eds F. Ochsenbein, M.G. Allen and D. Egret. ASP Conference Proceedings, Vol. 314. San Francisco, ASP 2004, p.432

2005

- 101 INTEGRAL, XMM-Newton and Rossi-XTE Observations of the State Transition of the X-ray Transient and Black Hole Candidate XTE J1720-318**
Cadolle Bel, M.; Goldwurm, A.; Rodriguez, J.; Sizun, P.; Corbel, S.; Goldoni, P.; Parmar, A. N.; Kuulkers, E.; del Santo, M.; Ubertini, P.; and 4 coauthors
2005, *Conf. Proc. of the Société Française de Astronomie et Astrophysique 2004*, Juin 2004 Paris, France, Eds.: F. Combes, D. Barret, T. Contini, F. Meynadier and L. Pagani EdP-Sciences, Conference Series, p.66
- 102 Hard X-ray Observations of the Black Hole X-Ray Transient 4U 1630-47 and the Norma Region of the Galaxy**
J.A. Tomsick, R. Lingenfelter, S. Corbel, A. Goldwurm, P. Kaaret
2005, American Astronomical Society, HEAD meeting #8, #15.05
- 103 The High Energy Spectrum of Cyg X-1 as measured by INTEGRAL**
Cadolle Bel, M.; Sizun, P.; Rodriguez, J.; Goldwurm, A.; Laurent, P.; Goldoni, P.; Malzac, J.; Jourdain, E.; Roques, J.P.,
2005, *Conf. Proc. of the COSPAR 2004*, July 2004 Paris, France, Eds., in press
- 104 SIMBOL-X, a formation flying-mission for hard X-ray astrophysics**
P. Ferrando, A. Goldwurm, P. Laurent O. Limousin, J. Martignac, F. Pinsard, Y. Rio, J.P. Roques, O. Citterio, G. Pareschi, G. Tagliaferri, F. Fiore, G. Malaguti, U. Briel, G. Hasinger, L. Strueder
2005, *Conf. Proc. SPIE "Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy II"*, San Diego July 31st-Aug. 4th, 2005, Vol. 5900, 195, astro-ph/0508674

- 105 INTEGRAL Observations of GRS 1758-258**
 Cadolle Bel, M., Sizun, P., J., Goldwurm, A.
 2005, *Proc. of IAU Symp N. 230*, 15-19/8/2005 Dublin, Ireland, Eds. E.J. Meurs, G. Fabbiano, 93
- 106 The Galactic Centre at High Energies**
Goldwurm, A.
 2005, *Towards a Network of Atmospheric Cherenkov Detectors VII*, 27-29 April 2005 Palaiseau, France, Eds: B. Degrange, G. Fontaine, 297
- 2006**
- 107 A Multi-Wavelength Study of Sgr A*: The Correlation of X-ray, Near-IR and Sub-millimeter Emitting Flares**
 F. Yusef-Zadeh, C.D. Dowell, M. Wardle, D. Roberts C. Heinke, G. C. Bower, B. Vila Vilaro, S. Shapiro, A. Goldwurm, G. Belanger
 2006, *Conf. Proc. of the AAS Meeting 2006*, Jan 2006, in press
- 108 A Multi-Wavelength Study of Sgr A*: Near-IR Variability**
 Bushouse, H., Yusef-Zadeh, F., Heinke, C., Roberts, D., Shapiro, S., Goldwurm, A.
 2006, *Conf. Proc. of the AAS Meeting 2006*, Jan 2006, in press

Circulaires à l'Union Astronomique Internationale, Télégrammes Astronomique [T]

- 1 Nova Muscae 1991**
R. Sunyaev, E. Jourdain, A. Goldwurm, Circulaire UAI N° 5201 du 28 février 1991.
- 2 Nova Muscae 1991**
R. Sunyaev, J.-P. Roques, A. Goldwurm, Circulaire UAI N° 5310 du 18 juillet 1991.
- 3 Nova Muscae 1991**
R. Sunyaev, E. Churazov, M.C. Schmitz-Fraysse, A. Goldwurm, Circulaire UAI N° 5329 du 27 août 1991.
- 4 GX340-0 Region**
R. Sunyaev, E. Churazov, M.C. Schmitz-Fraysse, A. Goldwurm, Circulaire UAI N° 5342 du 11 septembre 1991.
- 5 GRS 0834-430**
R. Sunyaev, S. Grebenev, M. Denis, A. Goldwurm, Circulaire UAI N° 5437 du 23 janvier 1992.
- 6 GRO J0422+32**
A. Goldwurm, J. Paul, P. Mandrou, P. Techiné, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Dyachkov, Circulaire UAI N° 5589 du 17 août 1992.
- 7 GRO J0422+32**
Han, X.; Hjellming, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, B. Novikov, A. Goldwurm, J. Paul, P. Mandrou, P. Techiné, Circulaire UAI N° 5593 du 22 août 1992.
- 8 GRO J0422+32**
A. Vikhlinin, A. Finoguenov, A. Sitdikov, R. Sunyaev, A. Goldwurm, J. Paul, P. Mandrou, P. Techiné, Circulaire UAI N° 5608 du 9 septembre 1992.
- 9 Gamma-Ray Burst**
A. Goldwurm, M.-C. Schmitz-Fraysse, E. Churazov, & M. Gilfanov, Circulaire UAI N° 5720 du 16 mars 1993.
- 10 Gamma-Ray Burst**
A. Goldwurm, S. Gaertner, E. Churazov, & M. Gilfanov, Circulaire UAI N° 5932 du 10 février 1994.
- 11 The Galactic Center**
E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Dyachkov, M. Denis, M.-C. Schmitz-Fraysse, J.-P. Roques et A. Goldwurm, Circulaire UAI N° 6226 du 12 septembre 1995.
- 12 XTE J1755-324**
J. Paul, A. Goldwurm, E. Jourdain, J.P. Roques, R. Sunyaev, E. Churazov, S. Trudolyubov, E. Revnivtsev, Circulaire UAI N° 6746 du 22 Septembre 1997.
- 13 IGR J16320-4751**
J. A. Tomsik, R. Lingenfelter, R. Walter, J. Rodriguez, A. Goldwurm, S. Corbel, P. Kareet, Circulaire UAI N° 8076 du 19 février 2003.
- 14 IGR J16320-4751**
J. Rodriguez, A. Tomsik, L. Foschini, R. Walter, A. Goldwurm, Circulaire UAI N° 8096 du mars 2003.
- 15 INTEGRAL detection of hard X-ray emission from XTE J1720-318**
Goldoni, P.; Goldwurm, A.; Kuulkers, E.; Parmar, A.; Budtz-Joergensen, C.; Palumbo, G.; Roques, J. P.;

Sunyaev, R.; Favre, P, ATEL N° 153, 24 apr 2003.

- 16 IGR J16479-4514**
Molkov, S.; Mowlavi, N.; Goldwurm, A.; Strong, A.; Lund, N.; Paul, J.; Oosterbroek, T., ATEL N° 176, 11 Aug 2003.
- 17 IGR J1631.6-4028 a possible X-ray counterpart to 3EG J1632-4033 discovered by INTEGRAL**
Rodriguez, J. & Goldwurm, A., ATEL N° 201, 24 Oct 2003.
- 18 Two New INTEGRAL Sources: IGR J15479-4529 and IGR J16418-4532**
Tomsick, J. A.; Lingenfelter, R.; Corbel, S.; Goldwurm, A.; Kaaret, P., ATEL N° 224, Jan 2004
- 19 Chandra observations of IGR J16316-4028**
Rodriguez, J.; Foschini, L.; Goldwurm, A.; Beckmann, V.; Ebisawa, K., ATEL N° 253, Mar 2004.
- 20 Long duration X-ray burst from GX 3+1**
Brandt, S.; Lund, N.; Chenevez, J.; Budtz-Jorgensen, C.; Goldoni, P.; Belanger, G.; Goldwurm, A.; Kuulkers, E., ATEL N° 327, Sep 2004.
- 21 IGR J17331-2406**
Lutovinov, A.; Bel, M. Cadolle; Belanger, G.; Goldwurm, A.; Budtz-Jorgensen, C.; Mowlavi, N.; Paul, J.; Orr, A., ATEL N° 328, Sep 2004.
- 22 GRB040903 - a XRF?**
Kuulkers, E.; Gotz, D.; Mereghetti, S.; Goldoni, P.; Goldwurm, A.; Brandt, S. GCN N° 2699, 2004.
- 23 INTEGRAL High-Energy Detection of SWIFT J1753.5-0127**
M. Cadolle Bel, J. Rodriguez, A. Goldwurm, P. Goldoni, P. Laurent, P. Ubertini, S. Mereghetti, ATEL N° 574, Aug 2005.
- 24 INTEGRAL serendipitous hard X-ray detection of the millisecond pulsar HETE J1900.1-2455**
P. Goldoni, S. Soldi, S.E. Shaw, M. Cadolle Bel., P. Laurent, M. Falanga, A. Goldwurm, P. Ubertini, ATEL N° 590, Aug 2005.
- 25 INTEGRAL pointed observation of XTEJ1817-330**
P. Goldoni,, A. Goldwurm, et al., ATEL N° 742, 21 Feb 2006

Livres, éditions de comptes rendus

- 1 The Gamma-Ray Universe**
Septembre 2002, Comptes rendus de la conférence *The Gamma-Ray Universe*, XXXVIIth Rencontres de Morions, XIInd Moriond Astrophysics Meetings, 9-16 March 2002, Les Arcs, Savoie, France.
Éditeurs A. Goldwurm, D. Neumann et J. Trần Thanh Vân, Thê Giói Publishers, Vietnam.

Articles ou interviews publiés dans des revues de divulgation scientifique, des communiqués de presse ou des sites Internet

- 1 **SIGMA: Le ciel gamma se découvre à Evpatoria**
J.-P. Defait,
1994, *Ciel et Espace*, Octobre 1994, N. 295, p. 54.
- 2 **X-Ray Novae**
A. Goldwurm,
1998, activités scientifiques du SAp/DAPNIA/CEA sur le site
<http://dphs10.saclay.cea.fr/Phys/Sap/Activities/Science/Compact/Novae/index.html> /
- 3 **Notre trou noir fait de l'asthénie**
J. Paul, A. Goldwurm,
2000, *La Recherche*, Octobre 2000, N. 335, p. 40.
- 4 **New Evidence for the Black Hole Nature of a Milky Way Microquasar**
A. Goldwurm,
2001, printed press release at the Gamma 2001 Conf., 10:00 am Easter Daylight Time, April 4th 2001, at
<http://perry.sonoma.edu/gamma2001/>
- 5 **XMM-Newton links black hole to microquasar**
2001, *ESA XMM-Newton Science NewsReport*, 19th April 2001,
at <http://sci.esa.int/home/xmm-newton/>
- 6 **Galaxie au coeur tendre**
Lionel Ollive,
2001, *Science et Avenir*, Septembre 2001, N. 655, p. 72.
- 7 **Un sursaut X du Centre Galactique détecte avec XMM Newton**
A. Goldwurm,
10 janvier 2003, faits marquants DAPNIA/CEA sur le site
<http://www-dapnia.cea.fr/Phys/Sap/Actualites/>
- 8 **Contribution au site SAp/DAPNIA/CEA sur INTEGRAL**
novembre 2002 - mars 2003, différentes contributions sur le site
<http://www-dapnia.cea.fr/Phys/Sap/SiteIntegral/>
- 9 **Et en plus il tourne, le trou noir centrale de la Voie lactée**
J.F., Hait
2005, *Ciel et Espace*, Fevrier 2005, N. 417, p. 26.

Rapports de stages, thèses

- 1 **Emissione gamma dalle pulsar del Granchio e delle Vele**
A. Goldwurm, 1984, ricerca per il corso di Fisica Superiore, Università degli studi di Milano
- 2 **Studio dell'emissione X da una regione del piano galattico nella costellazione della Croce.**
A. Goldwurm, 1985, tesi di Laurea in Fisica, Università degli studi di Milano.